
MECÁNICA

La mecánica es la parte de la física que estudia la relación existente entre las fuerzas y sus efectos. Observando la naturaleza podemos dar la siguiente definición: «Fuerza es toda causa de alterar el estado de reposo o de movimiento de los cuerpos (figura 1) o de producir deformaciones en ellos». Las fuerzas, pues, son capaces de originar dos clases de efectos totalmente distintos: efecto dinámico y efecto deformador. La mecánica se divide en tres partes fundamentales, según estudie el movimiento (cinemática), las fuerzas (estática) o la relación que existe entre fuerza y movimiento (dinámica).



Figura 1

Si observamos el giro de una peonza, podremos advertir dos tipos de movimiento: un punto cualquiera de su superficie describe un movimiento circular, mientras que el cuerpo entero sufre un movimiento de rotación.

CINEMÁTICA

Ampère, científico francés fue el primero en definir esta ciencia a la que dio nombre: «La cinemática es el estudio del movimiento en su aspecto geométrico, considerando el tiempo, pero sin tener en cuenta las fuerzas que lo producen». Para ello nos servimos del concepto de **desplazamiento**, que es el vector distancia entre A y B (figura 2), siendo A el punto donde

ha comenzado el movimiento (origen) y B el punto que ocupa el móvil (final del vector). Es independiente del camino recorrido, que recibe el nombre de **trayectoria**. Dado que, además de indicar la distancia al origen, refleja la dirección del movimiento y su sentido, decimos que se trata de una magnitud **vectorial** (con módulo, dirección y sentido), por contraposición a las magnitudes **escalares** (como, por ejemplo, la distancia).

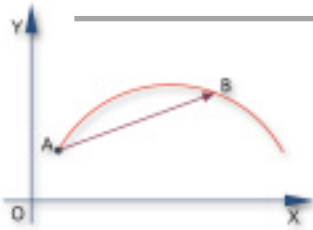
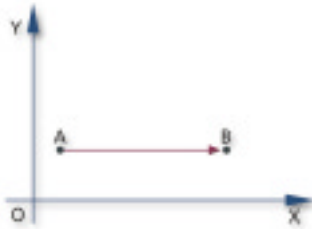


Figura 2



VELOCIDAD

A partir del concepto de desplazamiento podemos obtener el de **velocidad** del objeto, que es la variación de dicho desplazamiento en función del tiempo. Dado que proviene de una magnitud vectorial, también la velocidad es una magnitud de este tipo, ya que para conocer con exactitud la velocidad de un cuerpo hay que precisar, además de su valor, su posición, la dirección que lleva y también el sentido. La velocidad se mide en m/s en el Sistema Internacional (SI), y en el Sistema Técnico (ST) y en el Sistema Cegesimal (CGS) se mide en cm/s. En la práctica, para el movimiento de los vehículos se utilizan como unidad los kilómetros por hora (km/h) (figura 3).

El producto del módulo de la velocidad por la masa del cuerpo en cuestión recibe el nombre de **cantidad de movimiento**.

También se puede definir la velocidad relativa de dos cuerpos. Así, la velocidad de la Luna en torno a la Tierra no es la misma que la que tiene en torno al Sol, ya que la Tierra se mueve a su vez en torno a éste. Para determinar dicha velocidad relativa hay que tener en cuenta qué movimiento llevan a cabo los cuerpos en cuestión. Así, para dos automóviles que viajan a la misma velocidad con respecto a la Tierra, pero por carriles de sentidos contrarios de una autopista, su velocidad relativa es la suma de la de cada uno de ellos, mientras que si lo hacen en el mismo sentido, es la resta (es decir, cero si ambas tienen el mismo módulo). Esta ley recibe el nombre de **ley de adición de velocidades**, y se cumple para velocidades bajas con respecto a la de la luz en el vacío.

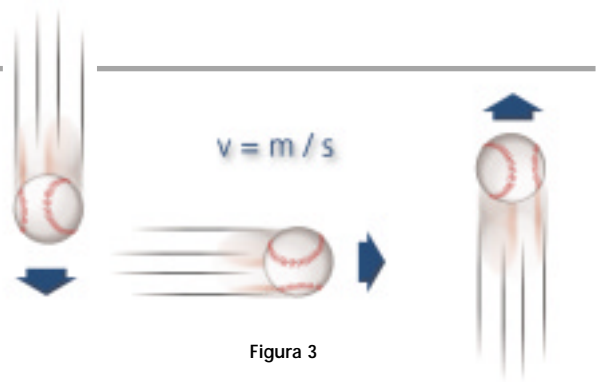


Figura 3

ACELERACIÓN

Para el tratamiento de la modificación de la velocidad de un cuerpo disponemos del concepto de **aceleración** (figura 4). Ésta se define como la variación de la velocidad en función del tiempo y se expresa, por tanto, en m/s^2 o en km/h^2 . La aceleración positiva, es decir, el aumento de la velocidad, se llama **aceleración**, mientras que la aceleración negativa, es decir, la disminución de la velocidad, se llama **deceleración**. Para que exista aceleración no es necesario que la velocidad varíe su intensidad siendo suficiente una variación en dirección o en sentido. La aceleración se mide en m/s^2 en los sistemas SI y ST, mientras que el CGS tiene por unidad de aceleración el cm/s^2 . Para aceleraciones muy grandes (despegue de cohetes, catapultas, centrífugas, etc.) se utiliza la expresión de xg , donde x es un número real. Así, si se dice que un cuerpo sufre una aceleración de $20g$ significa que su aceleración es veinte veces la que poseería soltado libremente en las cercanías de la superficie terrestre ($9 \cdot 9,81 m/s^2 = 88,29 m/s^2$).

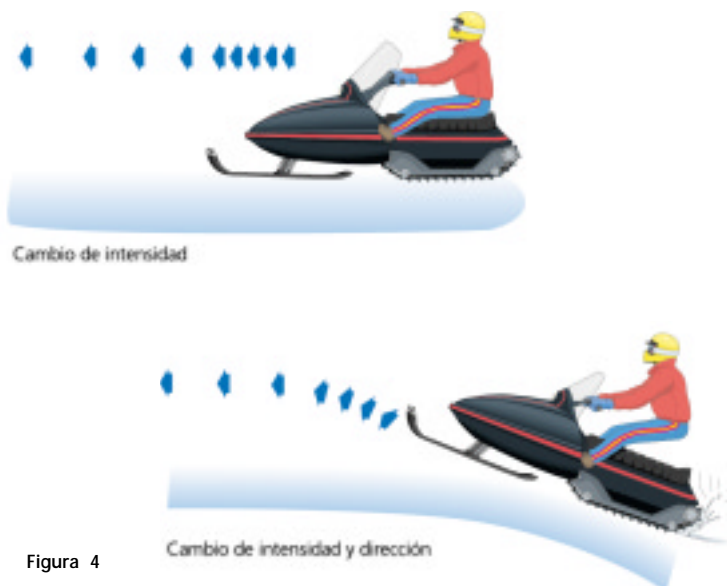


Figura 4

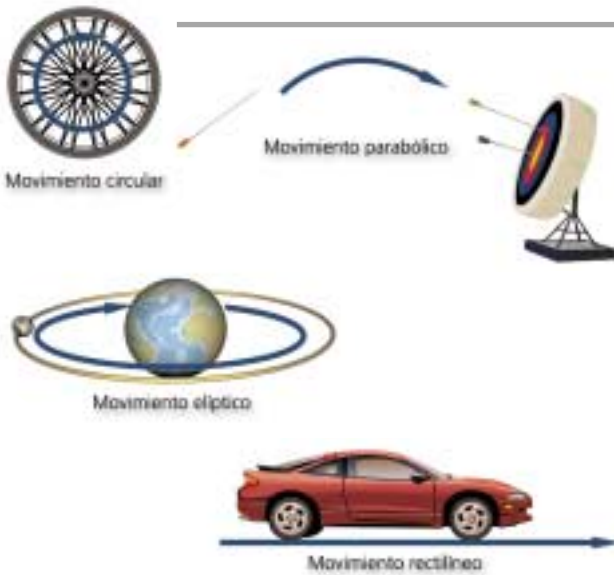


Figura 5

TIPOS DE MOVIMIENTO

Todo el Universo se mueve. Observando a nuestro alrededor vemos multitud de personas, animales y objetos en movimiento. Podemos hacer una gran clasificación en movimientos rectilíneos y curvilíneos (figura 5).

El **movimiento rectilíneo** es el más fácil de comprender. Si nos imaginamos un coche desplazándose por una autopista recta, siempre en el mismo sentido y a la misma velocidad, nos

encontramos con el **movimiento rectilíneo uniforme**. Si el coche acelera, su velocidad es cada vez mayor y el movimiento se conoce como **rectilíneo uniformemente acelerado**. Este movimiento también se presenta cuando un objeto cae al suelo desde una determinada altura. En este caso la aceleración se conoce como gravedad y es debida a la atracción de la Tierra. No depende de la masa del cuerpo y su valor medio es $9,8 \text{ m/s}^2$, designándose con la letra g , por eso también se llama movimiento de «caída libre».

Cuando el coche observado anteriormente empieza a frenar, su velocidad es cada vez menor y, por tanto, su aceleración es negativa. Se dice que describe un movimiento rectilíneo **uniformemente retardado**.

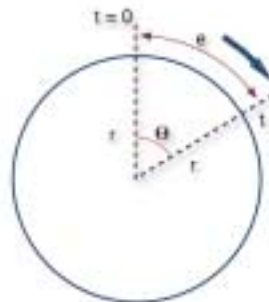


Figura 6

Un **movimiento** se dice **curvilíneo** cuando la dirección y el sentido de la velocidad van variando; por eso, la trayectoria del móvil no es recta. Dentro del movimiento curvilíneo, dos casos particulares son el movimiento circular y el movimiento armónico simple.

El **movimiento circular** es aquel por el que el cuerpo describe una trayectoria circular. Para estudiarlo nos serviremos de muchos de los conceptos definidos para el movimiento rectilíneo, que tienen sus homólogos en éste. La **velocidad angular** (figura 6) se define de un modo análogo a como definimos la velocidad lineal, es decir, el ángulo descrito en función del tiempo. Dado que los ángulos se miden en grados o en radianes (existiendo una relación entre ellos tal que $360^\circ = 2\pi$ radianes), la velocidad angular se medirá en grados/s o radianes/s.

Las magnitudes del movimiento circular están relacionadas con las correspondientes al movimiento lineal; así, por ejemplo, la distancia recorrida por una partícula que describe un movimiento circular puede expresarse como el producto de su distancia al eje de rotación (llamada radio) por el ángulo descrito en dicho movimiento expresado en radianes. La velocidad lineal se obtiene como producto del radio o distancia al eje por la velocidad angular, expresada en radianes/segundo (rad/s) (figura 7).

Igualmente, la aceleración puede dividirse en dos partes (perpendiculares entre sí), de las que una va dirigida hacia el centro (**aceleración centrípeta** o normal) y la otra es tangente a la trayectoria (**acele-**

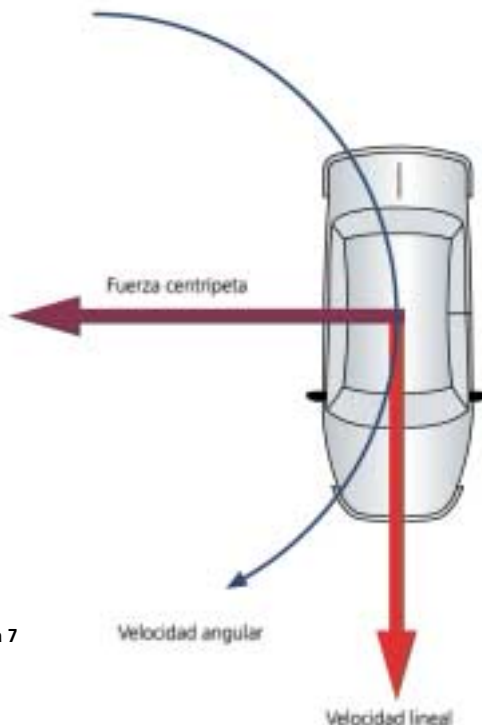


Figura 7

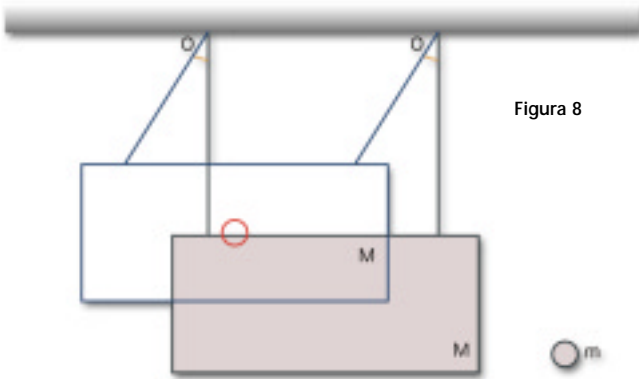


Figura 8

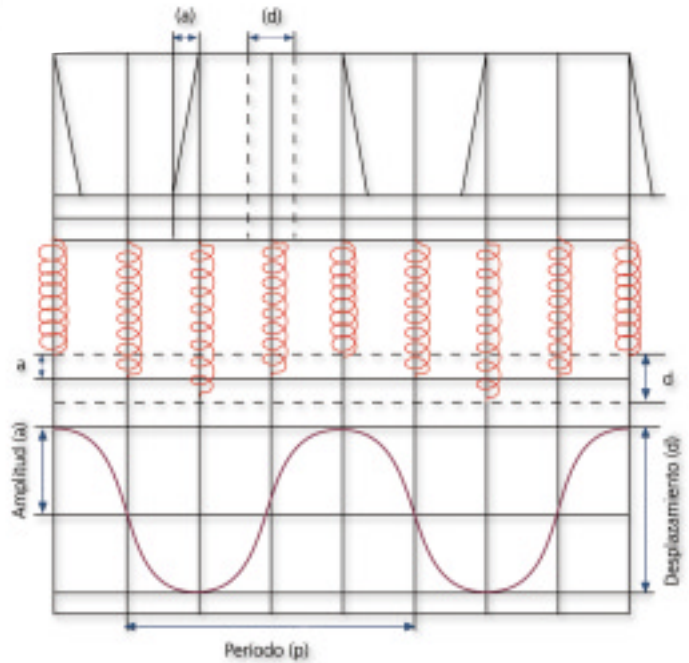


Figura 9

ración tangencial). El módulo de la primera se calcula elevando al cuadrado la velocidad y dividiendo por la distancia al eje de rotación, mientras que el módulo de la segunda es la distancia del punto al eje de rotación multiplicada por la aceleración angular. El otro movimiento particular, el **movimiento armónico simple**, es, por ejemplo, la oscilación regular del péndulo (figura 8) o de un resorte con un peso (figura 9). En dicho movimiento el objeto realiza una oscilación a lo largo de una línea, en cuyo centro se encuentra la posición de equilibrio y cuya aceleración es proporcional a la separación respecto de él. Para definirlo empleamos el **desplazamiento**, que representa la separación respecto de la posición de equilibrio. El máximo desplazamiento hacia ambos lados se define mediante el concepto de amplitud de la oscilación. Asimismo, la regularidad de la oscilación nos permite hablar de período, o sea, el tiempo

que tarda el objeto en describir un ciclo completo (esto es, en volver al lugar de partida), y de frecuencia, es decir, el número de ciclos completos que el objeto realiza en la unidad de tiempo.

Una observación más profunda del péndulo nos permite extraer algunas conclusiones importantes. Este dispositivo puede emplearse para determinar el valor de la constante gravitatoria (g) en el lugar donde se realiza la medida. Dado que sabemos que el período (T) de un péndulo en función de su longitud (l) es $T = 2\pi \sqrt{l/g}$, conociendo la longitud del péndulo empleado y midiendo su período, es posible determinar el valor de g .

En el péndulo descrito no se producía ningún tipo de amortiguamiento como consecuencia de su rozamiento con el medio; sin embargo, en realidad el movimiento armónico simple se ve amortiguado por esta causa, ya que la energía se va disipando lentamente. De todos modos, despreciando dicho efecto, podemos describir el balance energético del movimiento del péndulo como un proceso constante de transformación de energía potencial en cinética, y viceversa. La energía potencial es máxima en los puntos extremos (figura 10) (en los que la cinética es nula), mientras que decrece hasta cero en el punto central de la trayectoria (donde la energía cinética alcanza su máximo), ya que la energía total del sistema se conserva.

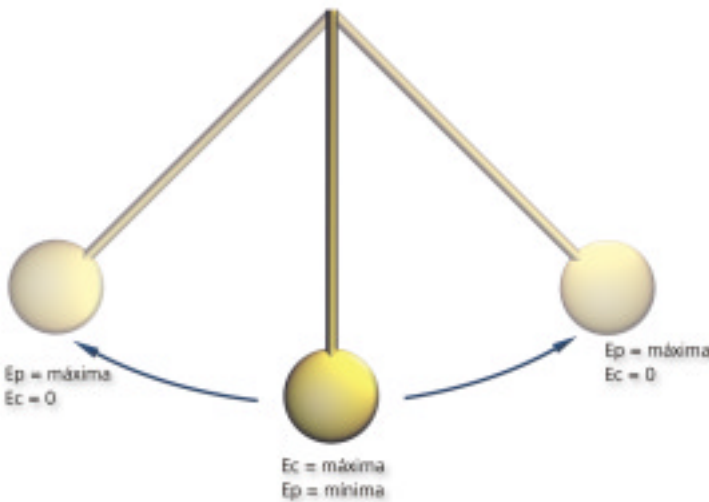


Figura 10

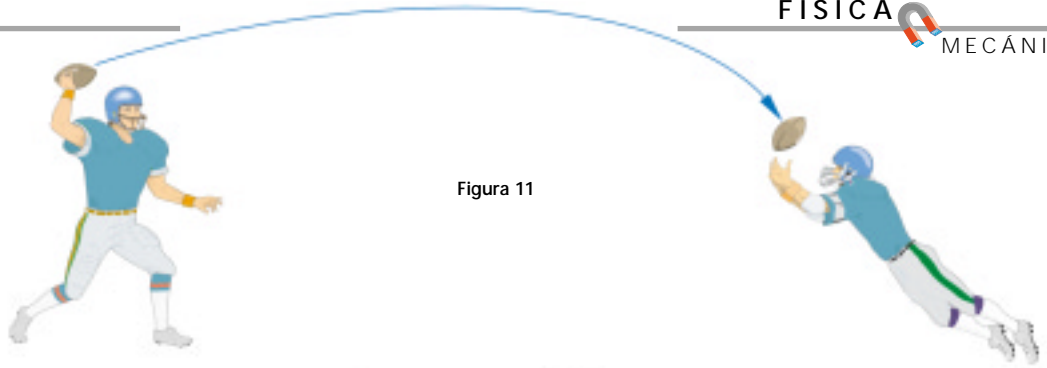


Figura 11

FUERZA Y SISTEMAS DE FUERZAS

Para comprender los resultados de la estática es necesario entender perfectamente el concepto de fuerza. La **fuerza** se puede definir como la causa que puede dar lugar a dos clases de efectos: dinámico y deformador. El **efecto dinámico** (figura 11) consiste en producir movimiento o modificarlo en trayectoria o velocidad, mientras que el **efecto deformador** (figura 12) es el que cambia la forma de los cuerpos. Si tenemos en cuenta el primer efecto, cuando actúa una fuerza sobre un cuerpo dejado en libertad, le comunica una aceleración.

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo elástico que no tiene libertad de movimiento, éste sufre una deformación. Esta deformación es directamente proporcional a la fuerza aplicada. La deformación de un muelle está regida por la ley de Hooke: $F = -Kx$; (figura 13), donde F es la fuerza que ejerce el muelle, K es una constante característica de cada muelle y x es el alargamiento que sufre dicho muelle. El signo menos es debido a que el muelle realiza una fuerza en sentido contrario al alargamiento sufrido. El valor de la K (constante de Hooke) depende del material que constituye el muelle, de su grosor, del diámetro de las espiras, de la separación que exista entre dos espiras consecutivas y finalmente de la temperatura.

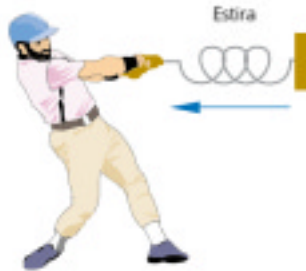


Figura 12

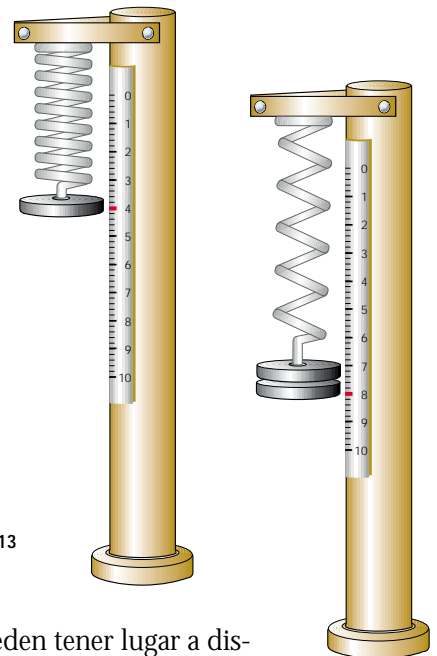


Figura 13

Las fuerzas pueden tener lugar a distancia (por ejemplo, la gravitatoria, la eléctrica y la magnética) (figura 14) o por contacto. Una de las fuerzas más conocidas por nosotros es la de atracción que la Tierra ejerce sobre todos los cuerpos que hay en sus proximidades, atrayéndolos hacia su superficie. Sin embargo, existen otras fuerzas como la de fricción, el empuje, etc.

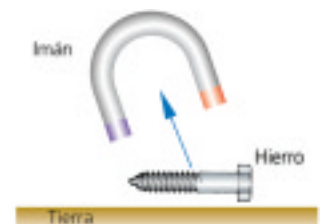
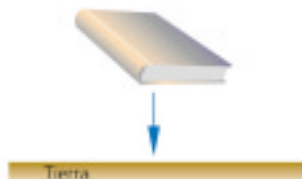
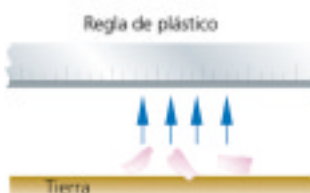


Figura 14

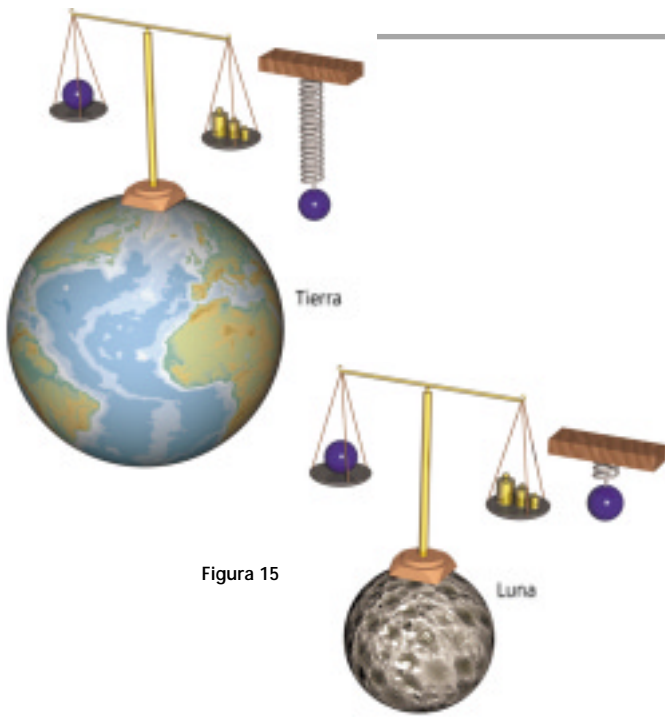


Figura 15

Otros dos conceptos fundamentales son la masa y el peso. La **masa** es una propiedad intrínseca de los objetos materiales, que determina la acción que ejerce una fuerza sobre un cuerpo y la resistencia que éste opone a una modificación de su estado de movimiento; por tanto, la masa es, en cierta forma, una medida de la inercia de los objetos. Cuanto mayor es la masa, tanto menor es la aceleración que les imprime una misma fuerza aplicada sobre ellos. Por su parte, el **peso** de un objeto no es una propiedad intrínseca del mismo, sino que está determinado por la intensidad del campo gravitatorio que tira de él hacia el centro de la Tierra, es decir, la fuerza que ésta ejerce sobre dicho cuerpo. Por este motivo, un cuerpo con una masa determinada tendrá pesos distintos en la superficie terrestre y en la de la Luna, ya que la intensidad del campo gravitatorio de ésta es de tan solo una sexta parte de la del terrestre, debido a que su masa es menor. Por tanto, su peso en la Luna es, aproximadamente, seis veces menor que en la Tierra (figura 15).

Las fuerzas son magnitudes vectoriales; por tanto, en su representación se usan vectores. Con ellos se pueden poner de manifiesto las características de las fuerzas (dirección, sentido, punto de aplicación e intensidad).

Por otra parte, sobre un punto pueden actuar diversas fuerzas. La resultante sería una única fuerza que produciría el mismo efecto que todas juntas (figura 16). La operación de hallar la resultante se llama composición o suma vectorial de fuerzas (figura 17).

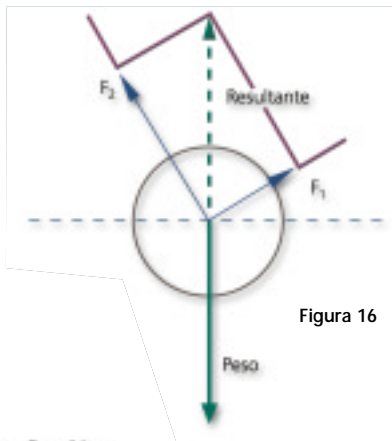


Figura 16

EQUILIBRIO

Decimos que un cuerpo está en equilibrio cuando no se modifica su estado de reposo o movimiento, o sea que permanece en reposo, o se mueve sin que varíen la intensidad, la dirección ni el sentido de su velocidad (movimiento rectilíneo uniforme). El equilibrio

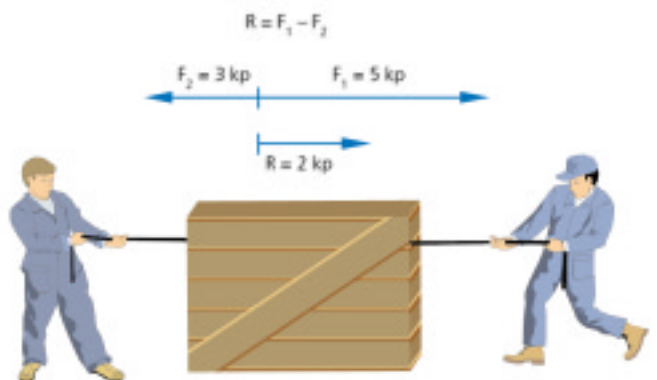
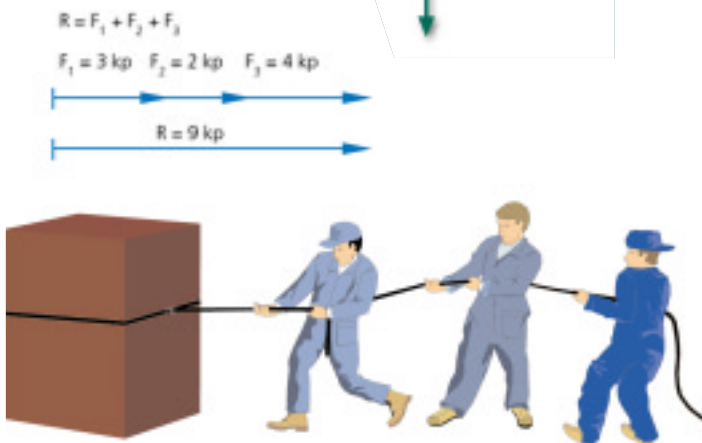


Figura 17

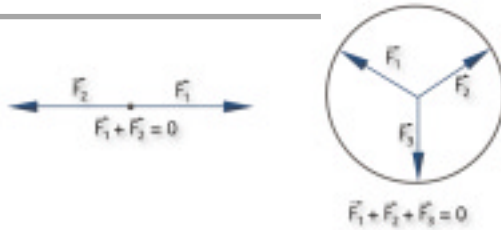


Figura 18

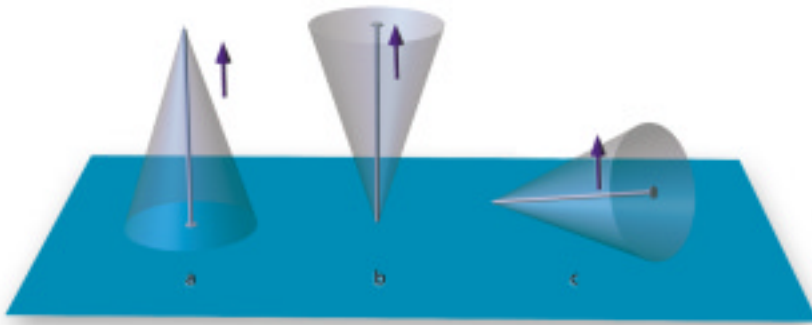


Figura 19

sólo se puede producir en dos casos: cuando no actúa ninguna fuerza sobre el cuerpo o cuando actúan varias fuerzas que se contrarrestan, anulándose sus efectos; esto se expresa diciendo que las fuerzas se equilibran (figura 18).

Para el estudio de la situación de equilibrio, como resultado de la actuación de todas las fuerzas externas sobre un cuerpo cualquiera, es de gran importancia la introducción del concepto de **centro de gravedad**, que es aquel punto del objeto en el que podemos suponer concentrada toda su masa. Para hallar la posición del centro de gravedad en un objeto plano, por ejemplo, se puede suspender éste de dos puntos distintos y trazar las líneas marcadas por la plomada que parten de ellos. Así, podemos definir la situación de **equilibrio estable** (a) como aquella en que la vertical que pasa por su centro de gravedad lo hace también por su base, y ambos están próximos. Si no es así, se encuentra en **equilibrio inestable** (b) (que puede romper cualquier pequeña perturbación), o **indiferente** (c), en el que la posición de equilibrio es indeterminada (figura 19).

Esta figura nos ayuda a imaginar qué sucedería si provocásemos un pequeño desplazamiento en cada uno de los tres conos en equilibrio sobre una superficie totalmente plana. El cono a después de este desplazamiento regresaría a su posición inicial, por este motivo el equilibrio que posee se llama estable. El cono b el más mínimo movimiento rompería el equi-



Figura 20



librio y variaría bruscamente su posición en busca de un nuevo equilibrio (equilibrio inestable) y el cono c no ofrecería ninguna reacción y adoptaría la nueva posición como una posición de equilibrio (indiferente). Todos estos principios y mecanismos de cálculo tienen una aplicación eminentemente práctica, ya que, por ejemplo, se emplean a diario para calcular las fuerzas a las que están sometidas las estructuras que soportan construcciones tales como torres de alta tensión, puentes, techumbres de naves industriales, etc. Por otro lado, las fuerzas pueden aplicarse, transmitirse o multiplicarse mediante el empleo de máquinas. Las más sencillas de ellas son las **palancas** (figura 20), constituidas por un **punto de apoyo** o **fulcro** sobre el que se basa un elemento rígido. Existen tres tipos básicos llamados, respectivamente, de primer (tenazas), segundo (carretilla) y tercer (pinzas) orden. Para evaluar su eficacia se emplea el concepto de rendimiento mecánico, que relaciona la carga

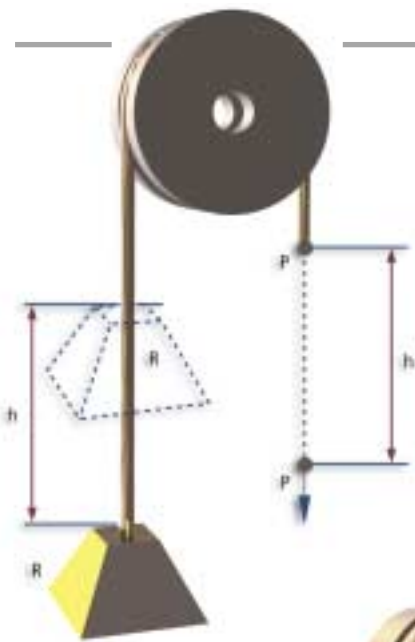


Figura 21

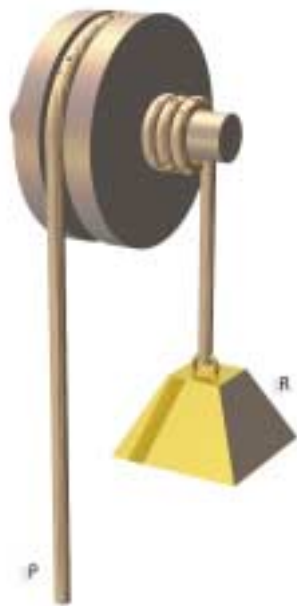


Figura 22

con el esfuerzo necesario para desplazarla. Asimismo, existe otro tipo de máquinas sencillas, llamadas **poleas**, que sin multiplicar el esfuerzo necesario permiten elevar cargas cada vez mayores, según el número de ellas que se empleen (figuras 21 y 22).

CAMPO GRAVITATORIO

La fuerza de atracción mutua que experimentan los cuerpos por el hecho de tener una masa determinada recibe el nombre de **gravitación**. La existencia de dicha fuerza fue establecida por el matemático y físico inglés Isaac Newton en el siglo XVII, quien además desarrolló para su formulación el llamado cálculo de fluxiones (lo que en la actualidad denominamos

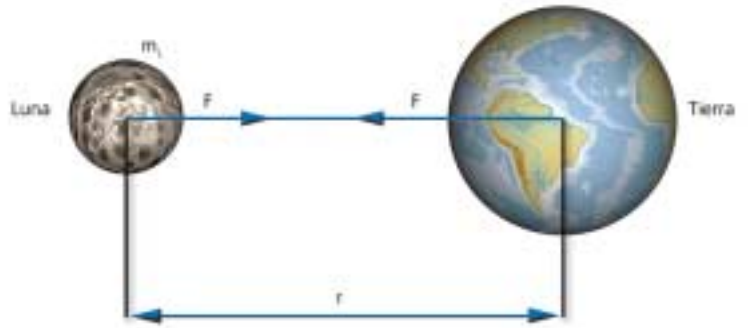


Figura 23

cálculo diferencial). La ley formulada por Newton, que recibe el nombre de **ley de la gravitación universal**, afirma que la fuerza de atracción que experimentan dos cuerpos dotados de masa es directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa (ley de la inversa del cuadrado de la distancia) (figura 23). La ley incluye una constante de proporcionalidad (G) que recibe el nombre de **constante de la gravitación universal**, cuyo valor, determinado mediante experimentos cuidadosos, es de $6,670 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

En los puntos cercanos a la superficie de la Tierra se puede considerar que el radio de ésta (R) es constante (6.370 km). Por ello, en el cálculo de la fuerza con que es atraído un cuerpo, $g = G \cdot (M \cdot m / R^2)$, todo, excepto la masa de éste (m), es constante, y queda $g = 9,8 \text{ N/kg}$, que es el valor constante del campo gravitatorio terrestre en los puntos cercanos a la superficie de la Tierra. Recibe el nombre de **gravedad terrestre** (figura 24). Multiplicando la gravedad por la masa del cuerpo obtenemos la fuerza de atracción, que recibe el nombre de **peso** del cuerpo.

Cada una de las pequeñas porciones de un cuerpo tiene su peso. La suma de todos estos pesos elementales es el peso del cuerpo. Así pues, el peso es la suma de muchas fuerzas paralelas entre sí (figura 25). El punto de aplicación de esta fuerza que llamamos peso recibe el nombre de centro de gravedad (c. d. g.). El centro de gravedad de un cuerpo homogéneo con simetría geométrica coincide con su centro geométrico. El centro de gravedad de una esfera maciza o hueca es su centro, el de un prisma es el punto donde se cortan sus diagonales, etc. El centro de gravedad es un punto imaginario ya que su situación, como es el caso



Figura 24

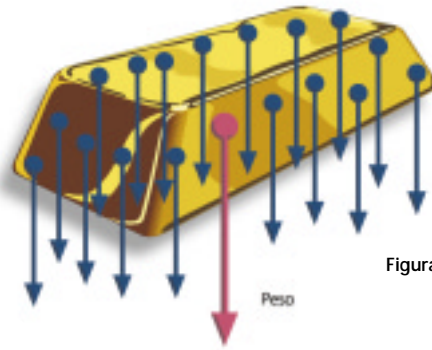


Figura 25



Figura 26

de una esfera hueca de paredes homogéneas, estará situado en un punto donde no hay masa.

La aceleración de la gravedad tiene valores diferentes, dependiendo del cuerpo sobre el que se mida. Así, mientras que para la Tierra se considera un valor medio de $9,8 \text{ m/s}^2$ (que equivalen a los $9,8 \text{ N/kg}$ antes citados), el valor que se obtiene para la superficie de la Luna es de tan sólo $1,6 \text{ m/s}^2$ (figura 26), es decir, unas seis veces menor que el correspondiente a nuestro planeta. En uno de los planetas gigantes del sistema solar, Júpiter, este valor sería de unos $24,9 \text{ m/s}^2$, o sea, unas dos veces y media el de la Tierra (figura 27).

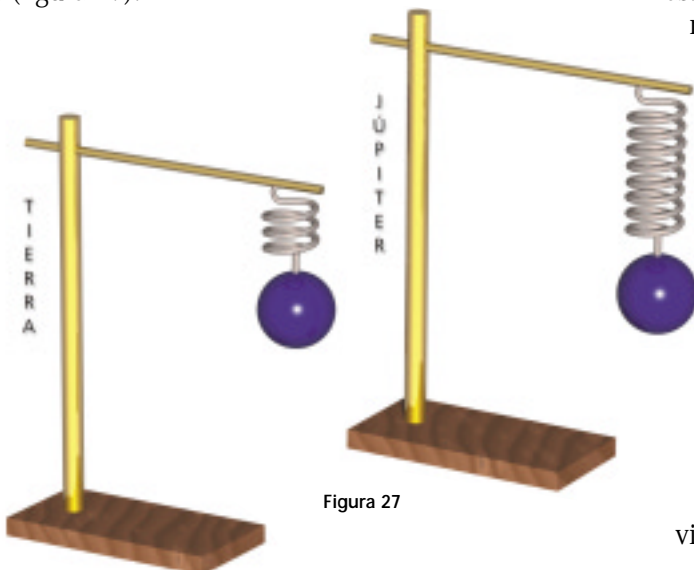


Figura 27

DINÁMICA

La dinámica es la parte de la Física que se ocupa del estudio del movimiento de los cuerpos en relación con las causas que lo producen, es decir, con las fuerzas. Aristóteles se planteó el cómo y el porqué del movimiento de los cuerpos. Sus ideas, recogidas en su obra *Física*, perduraron desde el siglo IV a.C. hasta el siglo XVII con los trabajos de Galileo, Descartes y Newton.

LEYES DE NEWTON

Las leyes fundamentales de la dinámica son las llamadas leyes de Newton, que éste formuló en su obra principal *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*, 1687).

La **primera ley de Newton** afirma que un cuerpo permanece en reposo o estado de movimiento rectilíneo y uniforme siempre y cuan-



Figura 28

do no actúe sobre él fuerza alguna (figura 28). La **segunda ley de Newton** dice que la variación de la cantidad de movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza que actúa sobre él (figura 29). Por tanto, la variación de la cantidad de movimiento (la masa por la velocidad) puede deberse o a la variación de la masa o a la de la velocidad, o a la de ambas a la vez. Sin embargo, como la masa es una propiedad intrínseca e invariable del objeto, dicha modificación es resultado de la variación de la velocidad, es decir, la aceleración, con lo que la formulación de la segunda ley de Newton queda como $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$, donde \vec{F} es la fuerza, m la masa del objeto y \vec{a} la aceleración que experimenta por la acción de la fuerza. Dado que \vec{a} tiene carácter vectorial y m escalar, la fuerza debe tener forzosamente carácter vectorial. De este modo introducimos el concepto de la **inercia**, es decir, la resistencia que ofrece el objeto a modificar su estado dinámico, y la relacionamos con su masa, que constituye de este modo una medida de su inercia.

La **tercera ley de Newton** (Principio de acción y reacción) afirma que si un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro (acción), éste ejerce a su vez la misma fuerza, pero de sentido contrario (reacción), sobre el primero. El patinador aplica una fuerza horizontal contra la pared (acción), en el mismo instante la pared devuelve una fuerza de la misma intensidad y dirección pero en sentido contrario sobre el patinador. Esta fuerza (reacción) que recibe el patinador es la que hará que éste se aleje de la pared. Otro ejemplo de este principio nos lo ofrecen los cohetes (figura 30), cuyos potentes motores queman el combustible y lo expulsan por las toberas a gran velocidad hacia el exterior. Esto da lugar a un empuje (acción) que produce una reacción (fuerza igual, pero de sentido contrario) que hace que el cohete avance. Cuando dicha reacción supera la fuerza de atracción que la Tierra ejerce sobre él, el cohete despega.

En este principio es importante resaltar que el punto de aplicación de las fuerzas de acción y reacción es en cuerpos distintos.

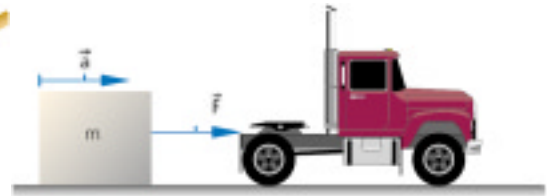


Figura 29

CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La cantidad de movimiento de una partícula es una magnitud vectorial cuyo módulo se define como el producto de la masa por la velocidad de dicha partícula.

Entre las posibles interacciones de los cuerpos sólidos en movimiento destacan los choques, en los que la colisión hace que se modifique el régimen del movimiento de ambos cuerpos. La pistola y la bala alojada en su cargador antes del disparo tienen velocidad y cantidad de movimiento cero. Durante el disparo la pólvora ejerce una fuerza (fuerza interior) sobre la bala y también sobre la pistola. Estas dos fuerzas son iguales pero de sentido contrario y proporcionan a la bala y a la pistola una aceleración inversamente proporcional a su masa. Como la fuerza es interior, la cantidad de movimiento adquirida por la bala (pequeña masa y gran velocidad) y la adquirida por la pistola (masa mucho mayor y pequeña velocidad de retroceso) serán iguales y de sentido contrario, siendo su suma cero, es decir, una fuerza interior del sistema no varía la cantidad de movimiento del mismo (figura 31). De las leyes que rigen las colisiones destaca la llamada **ley de la conservación de la cantidad de movimiento**, que nos

dice que la cantidad de movimiento de un sistema aislado permanece constante, es decir, que la suma de las cantidades de movimiento antes y después del choque son iguales. Para ilustrar esta ley supongamos dos bolas de billar sobre una mesa y hagamos que choquen. Si conocemos la masa de cada una de ellas y sus velocidades respectivas antes del choque, y determinamos la velocidad de una de ellas después del choque, es posible calcular la de la otra bola.

DINÁMICA DE LA ROTACIÓN

Un cuerpo que permanece en reposo puede estar sometido a rotación, por lo que cabe determinar las condiciones para que esto no suceda. Para ello nos servimos del concepto de **momento de una fuerza**, que es el producto vectorial entre el vector fuerza y el vector determinado por la distancia entre el eje de giro y el punto de aplicación de la fuerza. Como todos los productos vectoriales, el resultado (vector momento) será perpendicular al plano determinado por los vectores fuerza y distancia. Por tanto, para definir el equilibrio debemos añadir el llamado principio de los momentos, que afirma que la suma algebraica de los momentos de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo debe ser cero. Un caso particular de esta disposición de las fuerzas lo constituye el llamado **par de fuerzas**, formado por dos fuerzas de igual magnitud, de sentidos contrarios y separadas una cierta distancia. El efecto al que da lugar este par de fuerzas es una rotación, como en el caso del volante de un automóvil, en lugar de producir un movimiento rectilíneo. De todo lo dicho hasta ahora deducimos la necesidad de disponer de un mecanismo que nos permita llevar a cabo la suma de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, para poder determinar de este modo si se encuentra o no en equilibrio. Para determinar cuál es la fuerza con la que actúa, en definitiva, un conjunto de ellos sobre un objeto, disponemos de la llamada **regla del paralelogramo**, que nos dice que si tenemos dos fuerzas, hacemos coincidir sus puntos de aplicación y construimos el paralelogramo cuyos lados es-

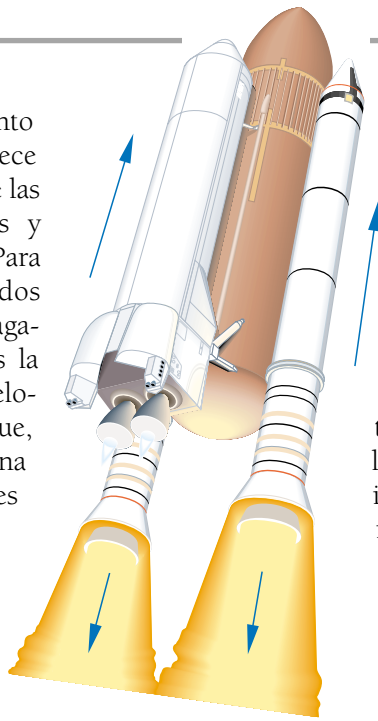


Figura 30



Figura 31

tán formados por las magnitudes de aquéllas, la diagonal de dicho paralelogramo nos indica la fuerza resultante de las dos primeras. De este modo es posible determinar cuál es la fuerza que actúa (resultante) en un sistema de dos o más fuerzas.

Además de usar esa regla, también se puede hacer la suma mediante la descomposición de los vectores en unos ejes coordenados (muy simple en muchos casos). Para ello, se hallan las componentes de los vectores en los ejes X e Y. Se suman,

con su correspondiente signo, todas las componentes de cada uno de los ejes, quedando una sola componente en cada eje. Finalmente, se suman estas dos componentes del eje X y del eje Y vectorialmente. Como son perpendiculares entre sí, simplemente se aplica el teorema de Pitágoras.

Cuando el momento de una fuerza actúa sobre un sólido rígido (cuerpo cuya forma no se modifica mientras se mueve, aunque esté sometido a la acción de una fuerza), éste experimenta una aceleración que se define como la variación de la velocidad angular en función del tiempo, y se mide (análogamente al caso del movimiento lineal) en grados/s^2 o en $\text{radianes}/\text{s}^2$. La inercia del movimiento lineal tiene, en el caso del circular, un homónimo, que es el **momento de inercia**; sin embargo, éste depende además de la forma del objeto y de la posición que ocupa en él el eje alrededor del cual se verifica la rotación. Las leyes de Newton nos permiten concluir que el **momento angular** de un cuerpo determinado es igual al producto de su velocidad angular por el momento de inercia, mientras que la **energía cinética de rotación** es el semiproducto de dicho momento de inercia por el cuadrado de la velocidad angular. Finalmente, el trabajo que efectúa el momento de una fuerza que actúa sobre el cuerpo en rotación es igual a la variación de su energía cinética de rotación, mientras que, cuando no interviene fuerza resultante exterior alguna, el momento angular total del sistema se conserva (es constante).

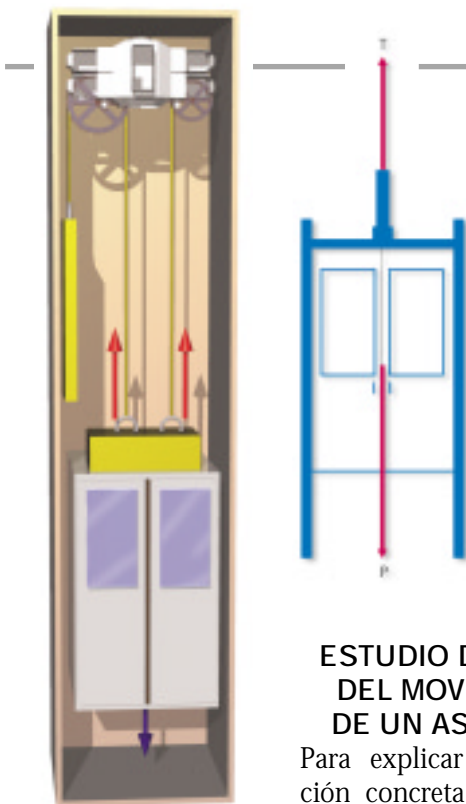


Figura 32

ESTUDIO DINÁMICO DEL MOVIMIENTO DE UN ASCENSOR

Para explicar una aplicación concreta del teorema fundamental de la dinámica ($\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$) nos vamos a

centrar en las fuerzas que tienen lugar en un ascensor, así como el sentido de la aceleración y de la velocidad en función de que dicho ascensor esté subiendo o bajando, acelerando o decelerando.

En la figura 32 se señalan las dos fuerzas que existirán siempre: el peso hacia abajo (por tanto negativo en signo) y la tensión del cable, hacia arriba (con signo positivo). Suponemos que no hay fuerza de rozamiento. Vamos a diferenciar 5 casos:

1. El ascensor se mueve con velocidad constante (es independiente el hecho de que éste suba o que baje). En esta circunstancia ambas fuerzas (tensión y peso) tendrán el mismo módulo, ya que si la velocidad es constante, no hay aceleración.
2. El ascensor parte del reposo y comienza a subir (es equivalente a considerar que va aumentando su velocidad hacia arriba). En este caso existe una aceleración hacia arriba (positiva), lo que implica que la tensión es mayor que el peso. Tanto la aceleración como la velocidad tendrán signo positivo (ambas hacia arriba).
3. El ascensor, subiendo, lleva una determinada velocidad y comienza a frenar, disminuyendo dicha velocidad (incluye el caso en el que llegue a parar). En este caso la tensión es menor que el peso. La velocidad lleva sentido positivo, y la aceleración, negativo.

4. El ascensor, parado, comienza a bajar (o, lo que es similar, desciende aumentando el módulo de su velocidad). En este caso la tensión es menor que el peso. La velocidad y la aceleración llevan sentido negativo.
5. El ascensor, descendiendo, comienza a frenar, lo que implica que la tensión es mayor que el peso. La aceleración es positiva, mientras que la velocidad es negativa.

Resumiendo, podemos decir que la velocidad siempre lleva el sentido del movimiento. Si va aumentando en módulo, la aceleración también llevará el mismo sentido, pero si la velocidad va disminuyendo la aceleración llevará sentido diferente.

AUTOEVALUACIÓN

1. De la definición de velocidad

$$\text{se deduce que: } v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

Calcular si un móvil se ha desplazado 200 m en 25 s con velocidad constante. ¿Cuál sería su desplazamiento si mantuviera durante una hora la misma velocidad?

2. La aceleración de un móvil que sufre un movimiento uniformemente acelerado es constante. Si un coche circula a 20 m/s y su aceleración es de 0,5 m/s², ¿cuál sería su velocidad al cabo de 1 minuto?
3. Sabiendo que la posición de un móvil que sufre un movimiento uniformemente acelerado es igual a: $x = x_0 + v_0 t + 1/2 a t^2$, calcular el tiempo que tardará en pararse un coche que circulando a 20 m/s, frena uniformemente y se para recorriendo una distancia de 100 m antes de hacerlo. Calcular también la aceleración que mantiene el coche durante la frenada.
4. ¿Qué velocidad lineal en km/h lleva un coche que gira con un radio de 300 m a una velocidad angular de 0,15 rad/s?
5. Si la longitud de un muelle es de 40 cm y al aplicarle una fuerza de 12 N su longitud aumenta hasta los 50 cm. ¿Cuál será la constante de Hooke del muelle en unidades del SI?



TRABAJO Y ENERGÍA

Las situaciones de equilibrio o movimiento de los cuerpos, que hemos estudiado, requieren un tratamiento más profundo mediante la consideración de otros efectos generados por la acción de las fuerzas tales como el trabajo y la energía.

Desde el punto de vista físico, diremos que un cuerpo tiene energía cuando es capaz de realizar un trabajo (figura 33) y realizar un trabajo es aplicar una fuerza, y que ésta provoque un desplazamiento. Así pues, tienen energía todos los cuerpos capaces de realizar en algún momento un trabajo.



Figura 33
A menudo se utiliza la palabra trabajo como sinónimo de esfuerzo. En física todo trabajo implica la realización de una fuerza y la existencia de desplazamiento del punto de aplicación de esta fuerza.

TRABAJO FÍSICO

El trabajo físico se define como el producto escalar de la fuerza aplicada por la distancia recorrida. Su magnitud depende de que la fuerza aplicada tenga o no la misma dirección que el movimiento en cuestión. Así, por ejemplo, si la fuerza y el movimiento tienen la misma dirección, la magnitud del trabajo efectuado es el producto de ambas (figura 34). Sin embargo, si la dirección de la fuerza no coincide

con la del movimiento, la magnitud del trabajo es menor, y resulta del producto entre la componente de la fuerza en la dirección del movimiento y la distancia recorrida, o, lo que es lo mismo, el producto del módulo del vector fuerza por el módulo del vector desplazamiento y por el coseno del ángulo que forman ambos (figura 35). El trabajo será, asimismo, positivo o negativo dependiendo de que la fuerza actúe en el sentido del movimiento o en sentido contrario a éste. El trabajo será cero

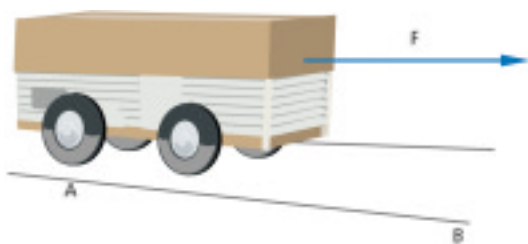


Figura 34

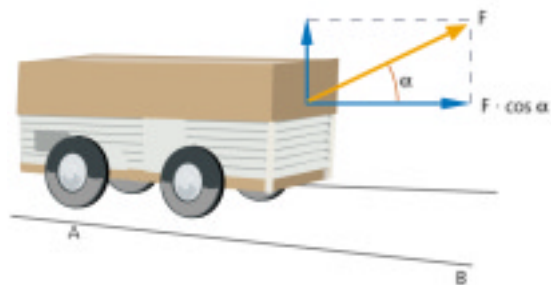


Figura 35



Figura 36

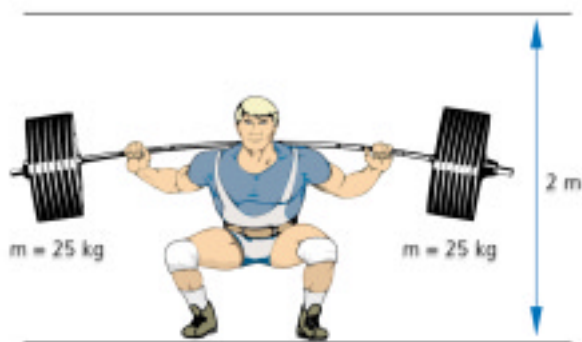


Figura 37

en el caso en que no haya movimiento y también si la fuerza y el desplazamiento son perpendiculares, puesto que $\cos 90^\circ = 0$ (figura 36).

La unidad de trabajo y también de energía en el Sistema Internacional es el julio (Joule). Un julio es el trabajo de desplazar un metro el punto de aplicación de una fuerza de un newton en su misma dirección y sentido. Existen otras unidades de trabajo: el ergio en el Sistema Cegesimal de unidades y el kilopondímetro en el Sistema Técnico. El ergio es el trabajo de transportar 1 cm el punto de aplicación de una fuerza de una dina y para el kilopondímetro la traslación es de un metro y la fuerza de un kilo fuerza o kilopondio.

ENERGÍA

La energía se define, por lo general, como la capacidad de que dispone un sistema para realizar un trabajo. A este respecto existen diversos tipos de energías físicas, como pueden ser la cinética (o debida al movimiento), la potencial (o de la posición), la térmica (o del calor), etc.

La **energía cinética** es la que posee un cuerpo en razón de su velocidad, es decir, es igual al trabajo

necesario para que dicho objeto alcance una determinada velocidad, o para que desde dicha velocidad llegue al reposo.

La **energía potencial** es la que tienen los cuerpos a causa de la posición que ocupan con respecto a un sistema de fuerzas. La energía potencial que adquirirán las pesas depende de la altura que alcancen éstas sobre el suelo. El practicante de halterofilia con su esfuerzo muscular aplica una fuerza vertical hacia arriba produciendo un trabajo. Este trabajo se traduce en una velocidad (energía cinética) y en la adquisición de una posición cada vez más elevada (energía potencial). Cuando llegue a la altura deseada su fuerza se limitará a vencer el peso y toda la energía adquirida por las pesas será potencial (figura 37). Así, los cuerpos que se encuentran sometidos al campo gravitatorio creado por la Tierra varían su energía potencial cuando modifican su altura respecto de la superficie de ésta, o sea, cuando se hace trabajo para que la aumenten o cuando transforman parte de su energía potencial en cinética (al caer). La energía potencial gravitatoria se mide respecto de un nivel cero arbitrario, que generalmente se escoge como el nivel de la superficie terrestre.

La **energía térmica** es la que tiene un cuerpo en función de su temperatura, y de hecho es tan sólo una forma de energía cinética de los átomos o moléculas que lo componen, siendo tanto más alta cuanto

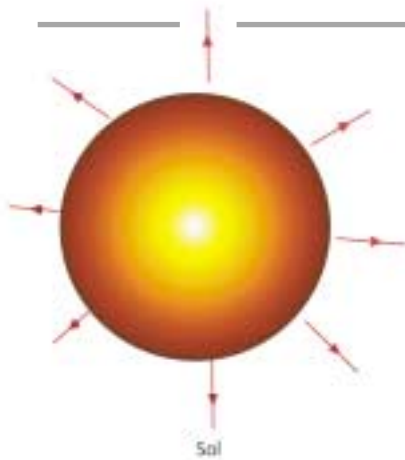


Figura 38

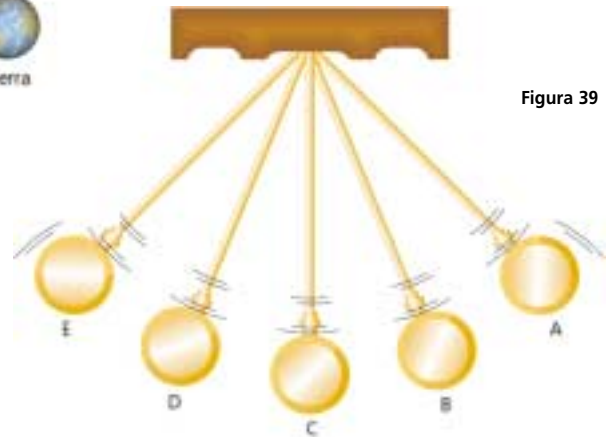
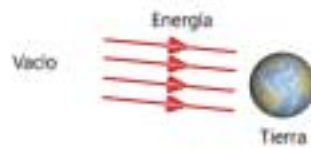


Figura 39

mayor es la temperatura y, por tanto, mayor es también la oscilación de los átomos o moléculas.

La **energía radiante** es la única forma de energía que puede existir en ausencia de materia, y está constituida por un movimiento ondulatorio de los campos magnéticos y eléctricos. Se produce por la caída de los átomos desde niveles superiores a otros inferiores y por la emisión del exceso de energía en forma de radiación, cuyos distintos tipos son los comprendidos por el llamado espectro electromagnético (figura 38).

La **energía sonora** está constituida por el desplazamiento de ondas de presión en un medio material como pueda ser el aire, el agua, un metal u otro cuerpo material. Dado que se trata de vibraciones de las moléculas del medio en cuestión, puede considerarse asimismo como una forma de energía cinética.

CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Entre todos los diversos tipos de energía existentes se producen procesos de conversión de una en otra, y cuando un cuerpo modifica la energía que dispone, ésta se transforma en otro tipo de energía como consecuencia del llamado **principio de conservación de la energía** (la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma). Una demostración gráfica sencilla de este principio es el péndulo. En él la energía va cambiando de cinética a potencial y, en ausencia de rozamiento, la suma de ambas es constante y se denomina energía mecánica (figura 39).

Una transformación de la energía de gran importancia tecnológica es la que convierte la diferencia entre la masa de los productos resultantes de una reacción nuclear y los productos de partida en energía de origen nuclear. En dichas reacciones una pequeña cantidad de masa da lugar a gran cantidad de energía, si

bien, en definitiva, a lo largo de toda la reacción la masa y la energía totales no han variado, es decir, se cumple el llamado principio de conservación de la masa y la energía. De acuerdo con la relación de Einstein, $E = mc^2$ (donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz en el vacío), la energía que se produce a partir de la masa es el valor de ésta multiplicado por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío, ya que la **teoría de la relatividad** demuestra la completa equivalencia entre la masa y la energía.

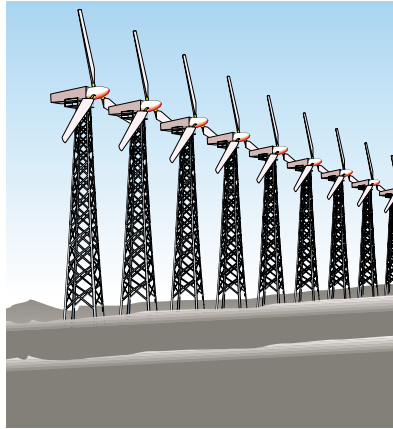
La transmisión de la energía se verifica con frecuencia mediante **movimientos ondulatorios**, es decir, a través de ondas, que son perturbaciones que, partiendo de un origen, transportan la energía con su avance. Las ondas se clasifican dependiendo de que la perturbación sea paralela o perpendicular a la dirección de propagación de dicha perturbación. Cuando es paralela se dice que la onda es **longitudinal** (como en el caso de las ondas sonoras), y cuando es perpendicular se dice que es **transversal** (que es el caso de las ondas electromagnéticas).

Además, las ondas presentan cuatro características definitorias, que son su amplitud, velocidad, frecuencia y longitud de onda. La primera, la amplitud, representa la máxima separación respecto de la posición del equilibrio. La velocidad se define como la longitud de onda multiplicada por la frecuencia, que a su vez es el número de vibraciones que realiza en un segundo. Finalmente, la longitud de onda representa la distancia que media entre dos crestas sucesivas de la perturbación. La onda transmite una energía (cinética y potencial) que depende de su velocidad, amplitud y frecuencia.

POTENCIA

Queda por considerar la realización del trabajo mencionado en función del tiempo.

La magnitud física que define este parámetro es la **potencia** (P), que expresa la cantidad de trabajo que puede hacerse en una cierta unidad de tiempo, y aumenta para un mismo trabajo cuando disminuye el tiempo en que éste se realiza. La unidad más utilizada de potencia es la del Sistema Internacional (SI) y es el vatio (W). El vatio es la potencia de una máquina que realiza el trabajo de un julio (J) en un segundo (s). La potencia de un vatio es muy pequeña y normalmente para expresar las potencias de las máquinas industriales se utiliza el kW ($1000 W$).



Las fuentes de energía **renovables** (figura 41) son aquellas cuya cantidad se puede considerar ilimitada, es decir, por mucho que se utilicen prácticamente no se agotan. Entre éstas se encuentran el Sol, el viento, el mar y los ríos.

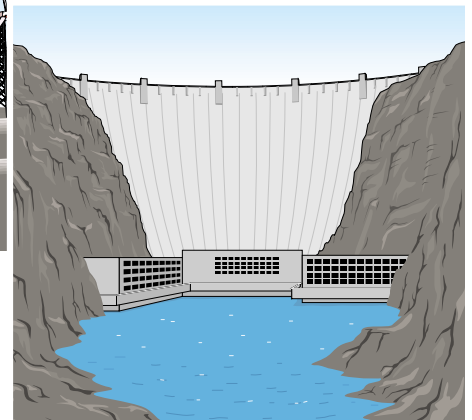


Figura 41

FUENTES DE ENERGÍA

Se llaman fuentes de energía aquellos recursos de la naturaleza a partir de los cuales el hombre puede obtener energía. Estas fuentes se clasifican según estos recursos sean o no renovables. Las fuentes de energía **no renovables** (figura 40) son aquellas que se agotan a medida que se utilizan; entre éstas tene-

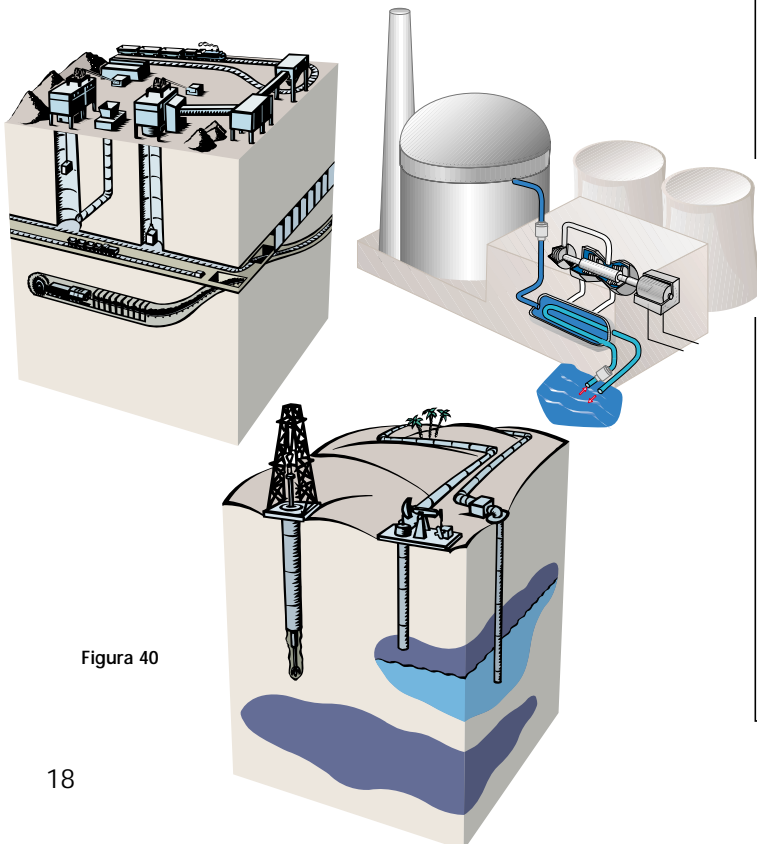


Figura 40

AUTOEVALUACIÓN

6. Calcula el trabajo que realiza una fuerza de $20 N$ si desplaza su punto de aplicación $40 cm$, siendo el ángulo que forman el desplazamiento y la fuerza de 60° .

7. Sabiendo que la energía potencial gravitatoria es: $E_p = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$ y la

energía cinética: $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$, si

lanzamos una piedra de $2 kg$ verticalmente hacia arriba a $10 m/s$, ¿qué velocidad poseerá cuando llegue a $2 m$ de altura? (consideremos la gravedad igual a $10 N/kg$ y no existen rozamientos con el aire).

8. ¿A qué altura llegaría la piedra del ejercicio anterior?

9. Si se aplica una fuerza de $2 N$ sobre un cuerpo y éste se desplaza $3 m$ en $5 s$ en la misma dirección y sentido que la fuerza, ¿qué potencia se ha desarrollado?

10. ¿Qué energía se desprendería si se destruyera $1 g$ de materia?



FLUIDOS

La materia se presenta en la naturaleza en cuatro estados físicos: sólido, líquido, gaseoso y plasma. Las partículas que forman un cuerpo en estado sólido ocupan posiciones fijas y tienen tamaño y forma definidos. Los estados líquido y gaseoso no tienen forma fija, sino que adquieren la del recipiente que los contiene; sus partículas pueden fluir, por eso se les llama fluidos (figura 42). El plasma está constituido por un fluido obtenido mediante la casi completa ionización de un gas, inicialmente neutro, a temperaturas muy elevadas; su localización no se puede realizar con recipientes convencionales, sino que requiere el concurso de campos magnéticos.



Figura 42
Los submarinos pueden aumentar su densidad y sumergirse, sustituyendo el aire de un depósito por agua. Para volver a la superficie bastará inyectar aire en el depósito para que desplace el agua.

ESTÁTICA DE FLUIDOS

A diferencia de los gases, los líquidos poseen forma propia en su superficie libre (superior) que, en general, es llana y horizontal curvándose ligeramente en las cercanías de las paredes del recipiente que los contiene, formando un menisco cóncavo o convexo según la naturaleza del líquido y del material que constituya las paredes del recipiente. El volumen

de los líquidos varía poco con las condiciones de presión y temperatura, por lo que se dice que son **incompresibles**. Los gases, debido a la gran movilidad que tienen sus moléculas, adoptan la forma del recipiente que los contiene, pero si no están contenidos en ninguno se expanden, por lo se dice que son expansibles (figura 43). El volumen es muy variable, propiedad que se denomina **compresibilidad**.

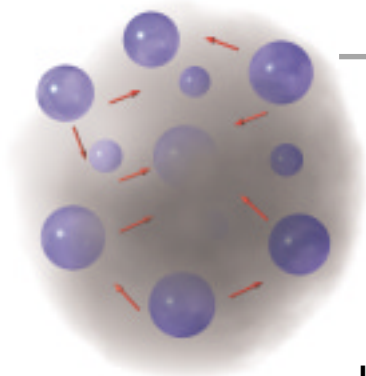


Figura 43

PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Llamamos **presión** a la fuerza que actúa sobre la unidad de superficie. Se mide en N/m^2 , unidad denominada **pascal**. La presión que existe en un punto cualquiera del interior de un líquido es debida al peso del líquido que hay por encima de él. El valor de la presión hidrostática en un punto se puede hallar multiplicando la distancia que hay hasta la superficie (profundidad) por la densidad del líquido y por la gravedad (figura 44). Así, si queremos saber la diferencia de presión que habrá entre dos puntos en un líquido homogéneo en equilibrio, deberemos calcular el valor de multiplicar la densidad del líquido, la gravedad y la diferencia de alturas entre los dos puntos (figura 45). La presión hidrostática tiene muchas aplicaciones prácticas, por ejemplo, el abastecimiento de agua de las ciudades (figura 46) o el fundamento de los manómetros que se utilizan para medir la presión de los gases.

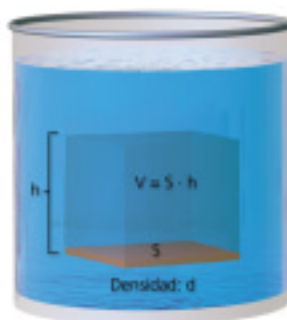


Figura 44

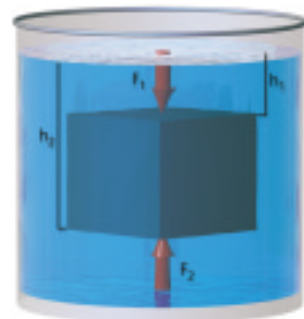


Figura 45

la presión de estación se ha reducido a un nivel común y se ha tomado como estándar el nivel del mar. También se debe corregir otro factor para estaciones de puntos geográficos diferentes, la latitud, que hace variar la presión como resultado de las diferencias en el campo de gravedad a diferentes latitudes. Todas se reducen a un valor patrón que es de $9,8 \text{ m/s}^2$ para 45° de latitud. Para hallar la presión sobre el nivel del mar es importante conocer que el peso de la columna de aire depende de la temperatura. Para representar la distribución de la presión en un mapa del tiempo de superficie, ésta se reduce al nivel del mar. Así, para representar en un mapa las variaciones de la presión para un momento determinado el meteorólogo dibu-

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La Tierra está rodeada por la atmósfera, que es una capa gaseosa constituida por una mezcla de gases. El peso de estos gases constituye la presión atmosférica que se mide con unos aparatos llamados **barómetros** (figura 47). La atmósfera es el escenario de los fenómenos meteorológicos; factores que determinan el tiempo atmosférico son la temperatura, la humedad o los procesos adiabáticos, que son los procesos que se llevan a cabo sin intercambio de calor desde el sistema exterior. La presión atmosférica del observatorio meteorológico se conoce como presión de estación. Teniendo en cuenta que la presión disminuye con la altura (figura 48), la estación que se encuentre a mayor altitud tendrá una presión más baja que la estación localizada a un nivel inferior. A fin de poder comparar presiones,

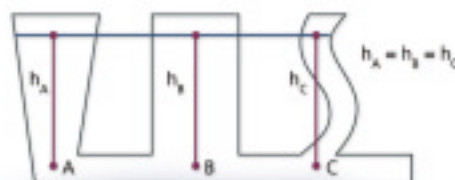


Figura 46

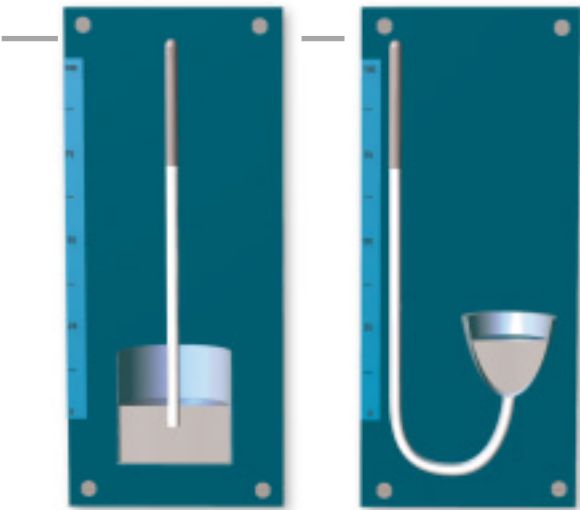


Figura 47

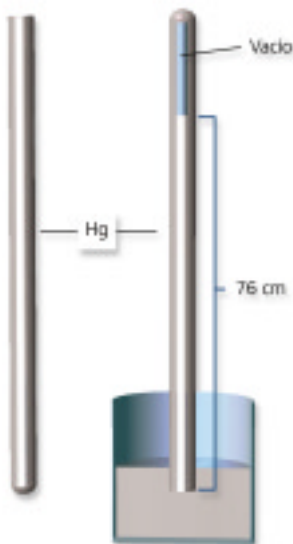


Figura 49

ja una serie de líneas llamadas **isobaras**, es decir, líneas que unen puntos que tienen la misma presión a nivel del mar.

Hay muchas formas de expresar la presión atmosférica, pero la más utilizada es la escala de milibares. La medida a nivel del mar es aproximadamente de 1.013 mb; también se define como atmósfera (atm), que equivale a 760 mm Hg. Las variaciones en la presión se deben a la desigual distribución de la temperatura en la atmósfera. Alta presión es una región de elevadas presiones relativas cuyos valores se incrementan hacia el centro de la misma (figura 49). Se denominan **anticiclones**. Baja presión es una región de bajas presiones relativas cuyos valores disminuyen hacia el centro de la misma. Se denominan también **depresiones** o **ciclones**.

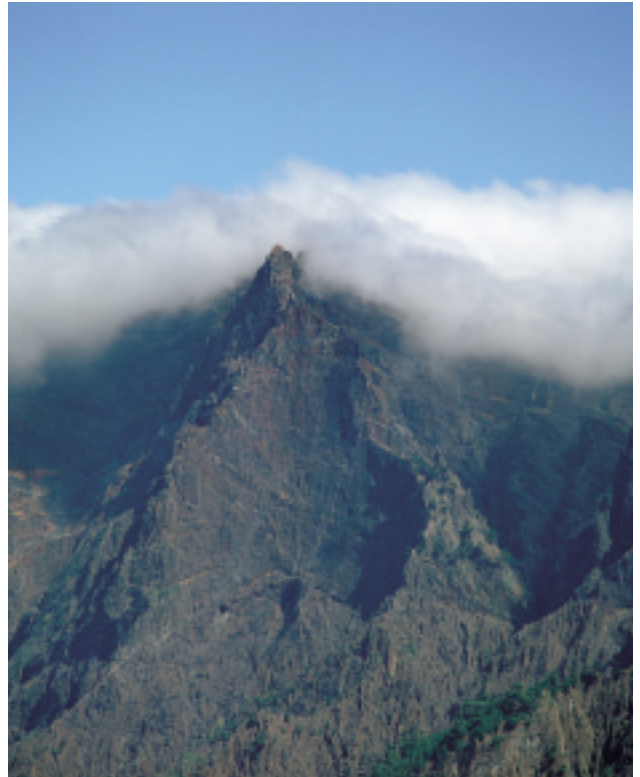


Figura 48

AUTOEVALUACIÓN

11. ¿Qué es la presión hidrostática?
12. ¿A qué se debe la presión atmosférica? ¿Es igual en todos los puntos de la superficie terrestre?
13. Enuncia el principio de Arquímedes.
14. ¿Por qué unos cuerpos flotan en el agua y otros no?
15. ¿Por qué es más fácil nadar en el agua del mar que en el de una piscina?
16. A 20 m de profundidad dentro del agua ¿quién sufre más presión: un niño o una persona adulta?
17. Un manómetro señala una presión de 43 atmósferas, ¿a cuántos mb corresponde?



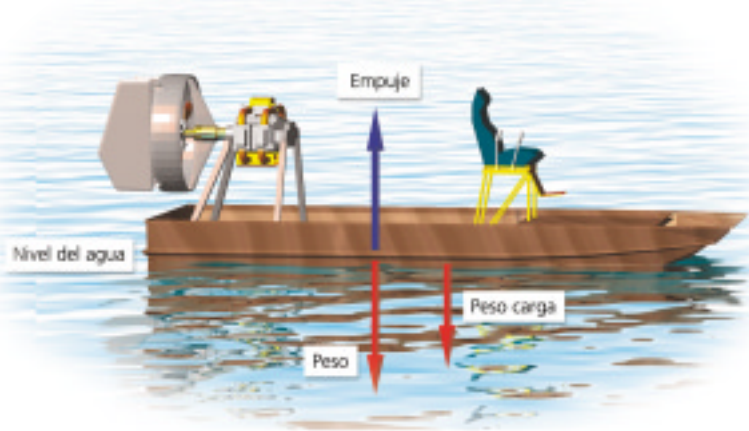


Figura 50

PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Al sumergir un cuerpo en un líquido se observa que éste se puede mover con más facilidad que fuera del líquido debido a que su «peso» parece que disminuye; así, hay objetos que flotan. El principio de Arquímedes dice que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del fluido desalojado (figura 50). Si pudiéramos ver el corte del casco de un buque nos daríamos cuenta de que está casi vacío, por esta razón, materiales que no flotan como el hierro pueden sustentarse en el agua. El peso de todos los materiales con los que está fabricado el buque sumados al de la carga que lleva es igual al peso del agua que ha desplazado la parte sumergida. Por este motivo la parte inferior de un buque se construye abombada para que sin hundirse demasiado desplace una gran cantidad de agua y pueda mantener a flote el resto de la nave. El empuje depende del volumen del cuerpo sumergido y de la densidad del líquido (figura 51). Los cuerpos inmersos en el aire también experimentan un empuje, pero muy pequeño, por ser muy pequeña la densidad del aire.

DINÁMICA DE FLUIDOS

El estudio de los medios continuos (fluidos) requiere una serie de conceptos nuevos que permitan tratar tanto el movimiento de los fluidos como los fenómenos que se producen en los cuerpos sumergidos en sus corrientes. El concepto principal es el de **viscosi-**

dad, la cual es debida a la fricción existente en el seno del líquido. Cuanto más espeso sea un líquido, mayor será su viscosidad. El coeficiente de viscosidad de las sustancias (que se mide en $N \cdot s/m^2$) indica la magnitud de la fuerza interna de rozamiento y la resistencia que opone el fluido a la circulación.

La **circulación** puede ser de diversos tipos, dependiendo de la velocidad a la que el fluido circula por el tubo (figura 52). Así, hablamos de **régimen laminar** cuando la velocidad no es excesivamente alta en relación con la viscosidad, y las capas del fluido se desplazan mutuamente con velocidades que aumentan hacia el centro del tubo. El **régimen no laminar o turbulento** se alcanza cuando, superado un cierto valor crítico para la velocidad, aparecen turbulencias en el seno del fluido. En la fase laminar la resistencia es proporcional a la velocidad relativa entre el fluido y el objeto, mientras que en la turbulenta depende del cuadrado de la velocidad relativa, por lo que aumenta para altas velocidades.

PRINCIPIO DE BERNOULLI

Consideremos la relación existente entre la presión y las energías cinética y potencial de un fluido que circula por el interior de un tubo. La velocidad del fluido se ve afectada por la modificación del diámetro del tubo, por lo que un estrechamiento implica una

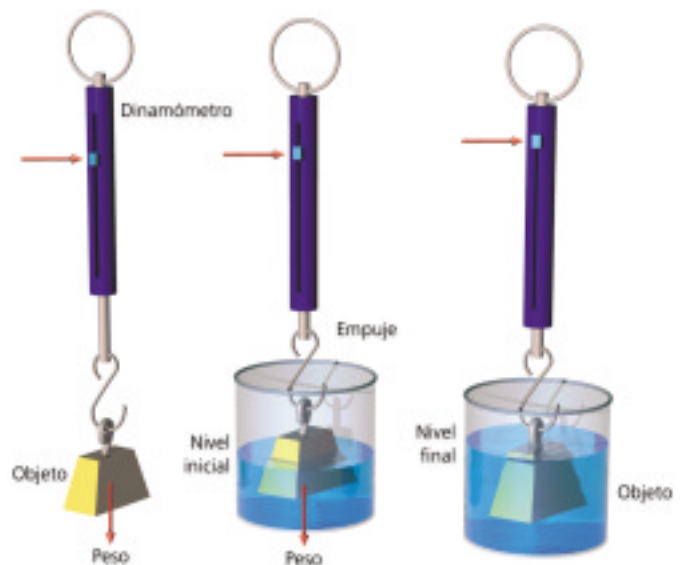


Figura 51

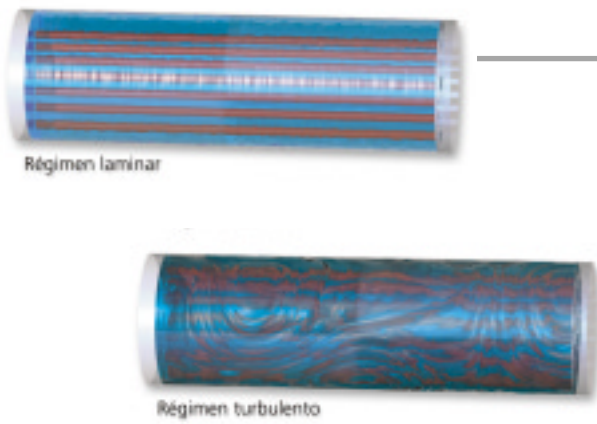


Figura 52

aceleración del fluido y un cambio de energía cinética. Al acelerarse el líquido aumenta su energía cinética y, así pues, la presión disminuye y baja la altura del líquido (figura 53). El principio de Bernoulli afirma que la suma de la presión multiplicada por la variación de volumen y las energías cinética y potencial del líquido es constante. Este hecho explica el fenómeno de sustentación de las alas de las aeronaves, ya que su perfil obliga a que la velocidad del aire sea mayor en la parte superior, por lo que la energía cinética disminuye y la presión es menor que debajo, lo que produce una fuerza resultante que sustenta al aparato.

EXPERIMENTO DE TORRICELLI

Torricelli tomó un tubo de vidrio de aproximadamente 1 m de longitud, que estaba cerrado por un extremo. Lo llenó de mercurio e introdujo el tubo por su extremo abierto en un recipiente también con mercurio, de forma que no se derramase. Pudo entonces observar que la columna de mercurio del tubo descendía hasta una altura aproximada de 76 cm (figura 54). La explicación de este fenómeno es la siguiente: la presión atmosférica equilibra la presión que ejerce la columna de mercurio, por lo que se dice que la presión atmosférica equivale a la presión que ejerce una columna de mercurio de 76 cm de altura. Este aparato se llama **barómetro** y se utiliza para la medida de la presión atmosférica. El espacio que queda en la parte superior del tubo se llama **vacío de Torricelli** y sólo contiene vapor de mercurio. La presión atmosférica varía con la situación climatológica y con la altura, por eso se suele tomar una presión de referencia. Al nivel del mar se toma como presión atmosférica normal la equivalente a la producida por una columna de mercurio de 76 cm. Se suele tomar como unidad de medida de la presión atmosférica el milímetro de mercurio (mm Hg),

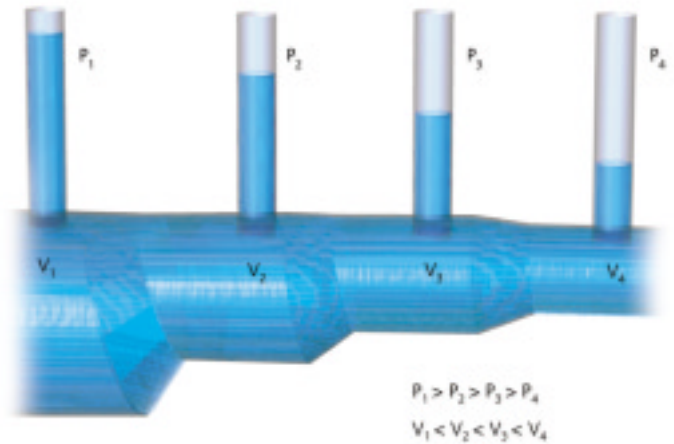


Figura 53

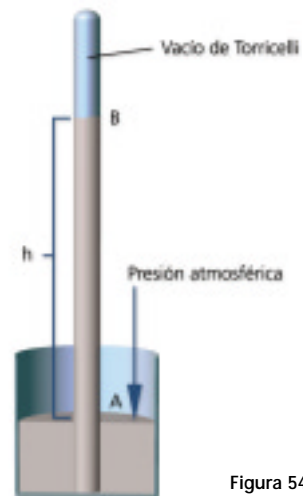


Figura 54

ya que las variaciones de presión suelen ser pequeñas. Un milímetro de mercurio se define como la presión que ejerce sobre el fondo una columna de mercurio de 1 mm de altura a 0 °C. A la presión que ejerce una columna de 760 mm Hg sobre el fondo se la conoce como atmósfera, y es otra de las unidades empleadas para la medida de presiones.

LEY DE STOKES

La caída de un objeto en el seno de un fluido se ve frenada por la viscosidad de éste (ley de Stokes). Dicha ley afirma que el retardo depende, entre otras causas, de la viscosidad del fluido, del tamaño del cuerpo y de su velocidad en el seno del fluido.

MOVIMIENTO DEL AIRE ATMOSFÉRICO

La Tierra es un cuerpo radiante, entre la radiación solar incidente, la reflejada y la emitida por el sistema global: continentes, atmósfera y océanos. La atmósfera puede considerarse como una máquina térmica con la fuente de calor en la zona ecuatorial, donde hay un superávit neto de energía, y un sumidero en las regiones polares, que tienen un déficit neto de energía. Una función de la atmósfera es transformar la energía potencial de la diferencia de calor entre trópicos y polos en energía cinética de movimiento que transporta el calor entre éstos. Si la Tierra no girase, el aire caliente ascendería por convección en el ecuador, se movería hacia los polos, donde perdería calor, se hundiría y regresaría como viento de superficie dejando parte de su energía cinética y el resto de su calor en la fricción con el suelo. Como la Tierra gira, las **fuerzas de Coriolis** deforman estas trayectorias hacia la derecha (hemisferio norte), de forma que el flujo hacia los polos gira hacia el este y el de regreso gira hacia el oeste (figura 55). El resultado es que la circulación se fracciona en una serie de circulaciones de carácter más zonal que meridional, es decir, alrededor de la Tierra, más que a lo largo de los meridianos, de forma que sólo una décima parte de este movimiento se proyecta en la dirección ecuador-polos. En la zona ecuatorial el aire que asciende se enfría y da lugar a la condensación y precipitación de agua (zona de selvas tropicales). En las zonas descendentes el aire se calienta, su humedad relativa decrece y producen sequía y buen tiempo, con falta de precipitación. El área de subsidencia o hundimiento atmosférico alrededor de los 30° de latitud queda así asociada con la mayor parte de las zonas desérticas terrestres y con la posición media de los grandes sistemas anticiclónicos semi-permanentes del Pacífico y las Azores, en el hemisferio norte, y del Pacífico, sur del Atlántico e Índico, en el hemisferio sur. Para conservar el momento de su cantidad de movimiento (con

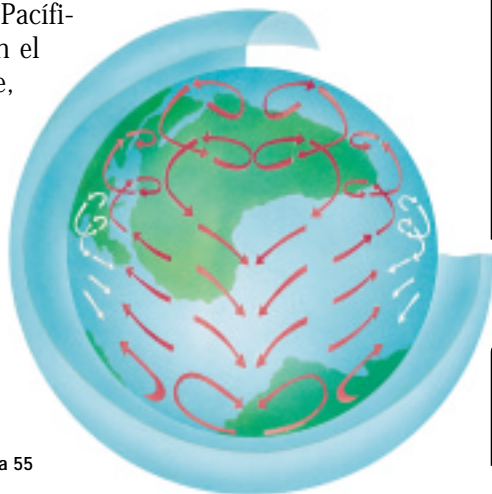


Figura 55

respecto a su eje terrestre), el aire en movimiento gana velocidad en su subida de latitud o la pierde con su bajada. Esto da lugar a la concentración de altas velocidades en las zonas de contacto de las zonas circulatorias que originan las corrientes de chorro llamadas **jet streams**. El jet stream polar no permanece fijo, sino que «meandrea». Esto causa perturbaciones en la posición del frente polar, existiendo una interacción entre ambos que da lugar a la formación de los sistemas frontales de ciclones y anticiclones en las latitudes medias. Un frente es la zona de separación de masas de aire con diferentes características. En este caso la masa de aire polar, fría y seca, y la subtropical más cálida y húmeda.

AUTOEVALUACIÓN

18. Define el principio de Bernoulli.
19. ¿Por qué tuvo tanta importancia el experimento de Torricelli?
20. ¿De qué depende la caída de un objeto en el seno de un fluido, según la ley de Stokes?
21. ¿Qué entendemos por frente en climatología?
22. Un cubo de 2 cm de arista construido en hierro, cuya densidad es $7,8 \text{ g/cm}^3$, ¿qué peso tendría sumergido en alcohol cuya densidad es $0,8 \text{ g/cm}^3$?
23. ¿Cuánto pesaría el cubo del ejercicio anterior sumergido en agua de densidad 1 g/cm^3 ?
24. El peso de un buque es igual: a) Al peso de la parte sumergida; b) al peso del agua desplazada por la parte sumergida; c) no existe ninguna relación.
25. Tenemos dos tubos idénticos: A y B. Por el A circula agua, por el B aceite a su misma velocidad. Si el aceite circula en régimen turbulento, ¿será forzosamente turbulento el régimen del agua?
26. A partir del principio de Bernoulli: La presión que ejerce el agua de un río contra su lecho es mayor: a) Cuando pasa entre dos rocas y con poca profundidad; b) cuando fluye tranquilamente por un cauce muy ancho y profundo; c) no influye ni la anchura ni la profundidad.



ESTUDIO MECÁNICO DE ALGUNOS MOVIMIENTOS

El estudio mecánico de un movimiento real (figura 56) puede ser muy complejo y sólo podría ser realizado por personas especializadas y muy expertas. Para que este estudio sea posible sin necesidad de tantos conocimientos, dejan de tenerse en cuenta algunas condiciones. Por ejemplo, en vez de estudiar el movimiento de un coche se estudia el movimiento de su centro de gravedad en el que suponemos que está concentrada toda su masa, despreciamos los rozamientos con el aire, suponemos que su aceleración es constante, etc. Si la experiencia del estudioso es más escasa, podemos estudiar este movimiento como si fuera el movimiento de un punto.



Figura 56

El jugador de voleibol golpea la pelota con un cierto ángulo y ésta describirá una parábola, que si no existieran los rozamientos con el aire sería perfecta.

TIRO HORIZONTAL

Se produce cuando una masa m es lanzada horizontalmente a una velocidad v_0 desde una altura h , cercana a la superficie terrestre, donde la gravedad es g . Esta masa, en ausencia de rozamientos, poseerá un movimiento en el plano cuya trayectoria será la rama descendente de una parábola.

Para su estudio dividiremos el movimiento en la suma de dos movimientos sencillos: uno horizontal, que en ausencia de rozamientos, es un movimiento uniforme, ya que no está sometido a ninguna fuerza en esta dirección, y otro movimiento vertical, en cuya dirección actúa el peso, que supondremos constante, por lo que, según el segundo principio de la dinámica, producirá un movimiento uniformemente acele-

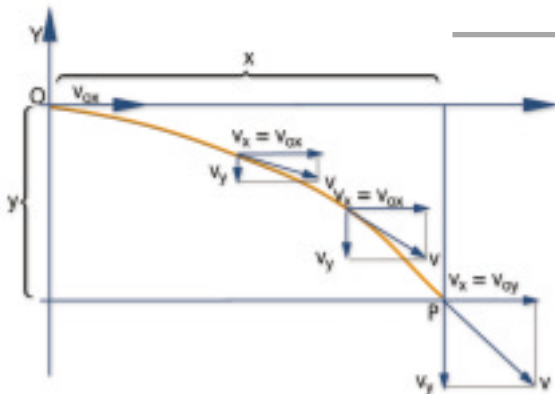


Figura 57

rado (figura 57). De la suma de estos dos movimientos perpendiculares entre sí se produce la trayectoria parabólica.

Estos dos movimientos aplicados a una sola masa tienen una característica en común: el intervalo de tiempo, de manera que si designamos por x la posición horizontal y por y la posición vertical, su expresión será el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + v_0 t \\ y &= h - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \right\}$$

Este sistema permite calcular para cada tiempo la posición horizontal y la altura a que se encuentra el móvil, así como la distancia horizontal desde la vertical del punto de partida hasta su choque con el suelo.

TIRO OBLICUO

Es un fenómeno muy parecido al anterior: la masa m es lanzada a una velocidad v_0 , pero el vector velocidad forma un ángulo determinado con la horizontal, de tal manera que su velocidad horizontal será: $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$, donde α es el ángulo de tiro, y su velocidad vertical en un principio no es cero, sino: $v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$.

A partir de este momento el tratamiento de este movimiento es idéntico al del caso anterior: se trata de un movimiento rectilíneo uniforme, si tenemos en cuenta el desplazamiento horizontal, o será un movimiento de lanzamiento vertical y, por tanto, un movimiento uniformemente retardado que invertirá el sentido de la marcha a partir de un momento dado, si tenemos en cuenta el desplazamiento vertical (figura 58). De la suma de los dos desplazamientos resul-

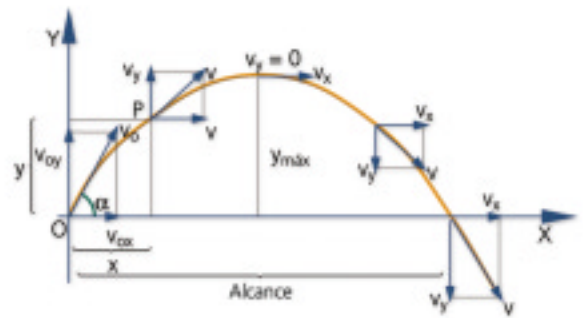


Figura 58

ta un movimiento parabólico, simétrico si las alturas de salida y de llegada son iguales. En la realidad, un tiro parabólico posee la rama ascendente más larga que la descendente, por la acción de los rozamientos. Si la altura inicial es y_0 , este movimiento se expresa por:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + v_0 t \cdot \cos \alpha \\ y &= y_0 + v_0 t \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \right\}$$

Con este sistema de ecuaciones es posible calcular gran cantidad de datos, entre los que se encuentran como más frecuentes: la altura máxima y el alcance.

Para calcular la **altura máxima** se tendrá en cuenta que el proyectil alcanzará esta altura en el instante que su velocidad vertical sea cero, es decir, cuando $v_y = v_0 \cdot \sin \alpha - g t = 0$, por lo que el tiempo será:

$$t = \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

Sustituyendo este tiempo en la ecuación del movimiento vertical, se determinará la altura máxima:

$$h_{\text{máx}} = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g} \right)^2$$

y, una vez efectuadas las operaciones indicadas, queda:

$$h_{\text{máx}} = y_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{g}$$

Se llama **alcance** la distancia horizontal entre el punto de lanzamiento y el punto en que el proyectil pasa otra vez por la misma altura. Éste sería el punto de impacto con el suelo si el terreno fuera llano y horizontal (figura 59). El jugador de fútbol de la figura ha de calcular la fuerza que aplicará a la pelota y además la dirección y el sentido. La intensidad de la fuerza será la responsable de la velocidad de salida del balón; esta velocidad junto a la dirección fijarán el punto de impacto del balón con el césped. Para un mismo punto, la velocidad de salida puede ser muy variada. Si la velocidad es muy grande, el tiro puede ser muy raso alcanzando poca altura (poca energía potencial y mucha energía cinética) o con un ángulo de salida muy grande (muy bombeado, alcanzando una energía potencial muy grande durante el recorrido), mientras que si la velocidad es pequeña el ángulo será próximo a los 45° para que el alcance del tiro sea el máximo posible.

El alcance se puede calcular a partir de la ecuación del movimiento, haciendo la posición vertical final igual a la posición vertical inicial, resolviendo la ecuación de segundo grado que se plantea y sustituyendo el tiempo obtenido en la ecuación de la posición horizontal:

$$y = y_0 + v_0 t \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2 = y_0$$

por lo que:

$$v_0 t \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2 = 0$$

y resolviendo la ecuación se calcula el tiempo:

$$t = \frac{2 v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

Se desprecia el otro resultado de la ecuación, $t = 0$, que es el tiempo del disparo. Sustituyendo el tiempo en la ecuación del movimiento horizontal, se obtendrá la distancia máxima a la que llega el lanzamiento:

$$x = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}$$

La distancia a la que se alcanza la altura máxima es la mitad del alcance.

EL GIROSCOPIO

Se denominan giroscopios los cuerpos que, poseyendo simetría de revolución, están animados de un movimiento de rotación alrededor de ejes libres. Por esta definición, la Tierra se puede considerar un enorme giroscopio.

Para su estudio, consideraremos en primer lugar fenómenos sencillos, como el del juguete denomina-

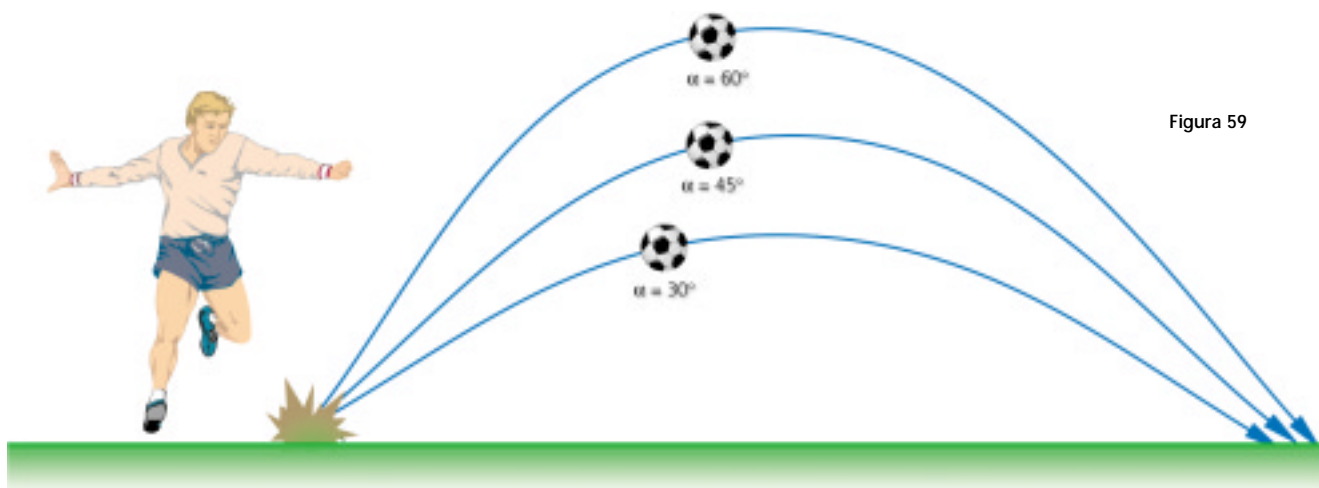


Figura 59

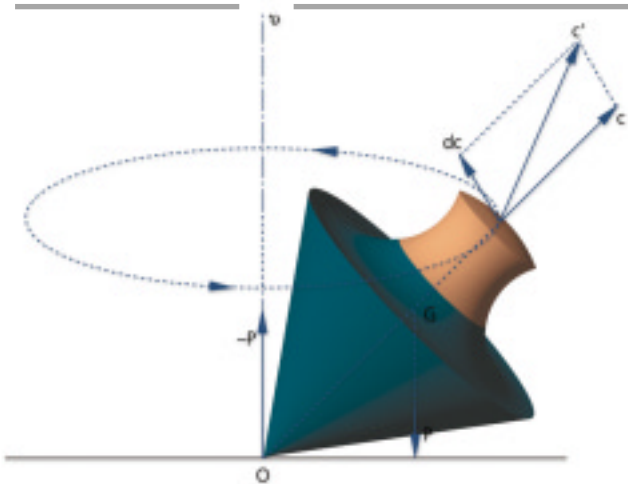


Figura 60

do trompo o peonza (figura 60). Cuando a este juguete se le imprime un rápido movimiento en torno a su eje y se apoya por su punta sobre un plano horizontal, su eje forma un ángulo ν con la vertical. En el centro de gravedad de la peonza G , actúa el peso \vec{P} que, unido a la fuerza de reacción del plano horizontal, según el tercer principio de la dinámica, $-\vec{P}$, constituye un par de fuerzas que tiende a derribar el trompo. A este par de fuerzas le corresponde un momento \vec{M} perpendicular a la inclinación de la peonza y dirigido según la ley del sacacorchos.

Por otra parte, por su rotación en torno a su eje, la peonza posee un momento cinético \vec{c} en la dirección del eje. La actuación del par del momento \vec{M} durante un intervalo de tiempo dt provocará una variación $d\vec{c}$ del momento cinético, de modo que se tendrá: $d\vec{c} = \vec{M} \cdot dt$. El vector $d\vec{c}$ tiene la misma dirección que el momento del par, M . Si en un momento dado, el momento cinético de la peonza es \vec{c} , después de un pequeño intervalo de tiempo dt se sumará vectorialmente a \vec{c} el incremento $d\vec{c}$; es decir, el eje de la peonza tenderá a orientarse según el momento cinético resultante \vec{c} y se inclinará en el mismo sentido que el momento del par.

En esta nueva posición se podría volver a empezar el razonamiento anterior, ya que la peonza se encuentra en una situación semejante. Es fácil comprender que la peonza adquirirá un movimiento de rotación con el punto de apoyo fijo en el plano y el extremo opuesto describiendo una circunferencia. Si no existieran los rozamientos o recibiera un impulso continuamente, la peonza poseería este movimiento por tiempo indefinido, pero en el mundo real los rozamientos van disminuyendo el momento cinético \vec{c} ,

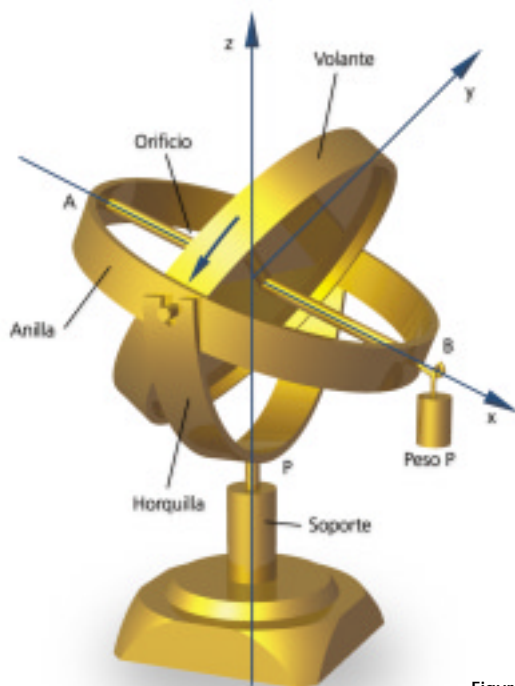


Figura 61

y el radio de la circunferencia va creciendo hasta que la peonza cae.

El giroscopio (figura 61) es un volante con un momento de inercia considerable (suele llevar una corona de plomo en su periferia), que posee un sistema de suspensión denominado **cardán**, que le permite girar libremente en todas direcciones sin estar sometido a fuerzas exteriores; con este fin, su centro de gravedad coincide con la intersección de los tres ejes de giro, de manera que su peso es neutralizado por las fuerzas de reacción desarrolladas en los cojinetes de la suspensión cualquiera que sea la posición del volante. Los ejes x e y son siempre perpendiculares entre sí, pero el plano que forma puede cambiar de posición con respecto al eje z , que siempre es vertical. Los rozamientos son muy pequeños. Imprimiendo un rápido movimiento de rotación al volante, éste persiste durante bastante tiempo. Estando el volante en reposo, su eje puede poseer cualquier posición y, haciendo girar el soporte, el rozamiento, a pesar de su pequeñez, es suficiente para que todo el giroscopio gire en bloque en torno a z . Si se hace girar rápidamente el volante, se observa que el eje de rotación presenta una gran estabilidad, y su orientación no se modifica sensiblemente si se gira el

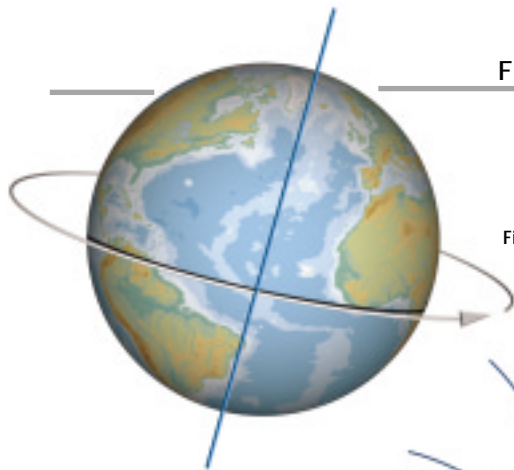


Figura 62

soporte. Si cuando está girando rápidamente se cuelga un peso P en la anilla del sistema de suspensión, es de esperar que el volante gire lentamente alrededor del eje y , pero lo que sucede es que gira uniforme y lentamente alrededor del eje z sin perder su plano de giro. Si el peso P se quita, su giro alrededor de z cesa rápidamente.

Si el giroscopio está girando rápidamente en torno al eje x , que suponemos horizontal, y obligamos a girar al aparato alrededor del eje z , en el sentido xy , se observa que el eje x se va levantando, girando en torno a y hasta ponerse vertical. El momento cinético del giroscopio tiende a coincidir con el momento del par de fuerzas que aplicamos.

Una de las aplicaciones del giroscopio está en el rayado interior de las armas de fuego, que imprime al proyectil un movimiento de giro que impedirá, en parte, las desviaciones que, de otro modo, producirían causas externas como el viento. El piloto automático o la estabilización de las naves aéreas, marinas o submarinas se obtienen mediante giroscopios. La horizontalidad de las brújulas en los vehículos que poseen movimientos bruscos se garantiza adaptando el aparato a un giroscopio.

ACELERACIÓN DE CORIOLIS

Imaginemos que nos encontramos en el polo norte, desde donde lanzamos un proyectil, sin rozamiento alguno, en dirección sur según un meridiano. Si la Tierra estuviera inmóvil, el proyectil recorrería todo el meridiano, y el experimento no tendría ningún interés. Pero como la Tierra gira de oeste a este (figura 62),

y suponemos que el móvil no participa de este movimiento (ya que partió del polo, que no gira), el proyectil se encuentra sobre un suelo que cada vez posee mayor velocidad lineal hacia el este y, desde nuestro punto de vista, parecerá que el proyectil está sometido a una fuerza que desvía su trayectoria hacia la derecha del meridiano.

Si desde el punto donde residimos lanzáramos el mismo proyectil hacia el polo norte, el proyectil inicialmente en reposo aparente (ya que participaba del movimiento de rotación de la Tierra), parte con una cierta velocidad hacia el este, al ir aumentando la latitud se va acercando a lugares con menor velocidad lineal y, como resultado, se verá que se desvía hacia la derecha del observador.

Al referir la posición de un cuerpo a unos ejes que giran con velocidad angular ω , el móvil parece estar sometido a una aceleración $2v\omega$, dirigida perpendicularmente a la velocidad que tiene el móvil, y en sentido opuesto al del movimiento de rotación. Dicha aceleración se denomina de Coriolis y no es más que una consecuencia de la inercia del móvil, pues se debe a que éste mantiene constante su propio vector velocidad. A esta aceleración debida a la inercia le corresponde una fuerza llamada también de Coriolis.

Estas fuerzas tienen importancia en meteorología. En el hemisferio norte, al dirigirse los vientos hacia el centro de bajas presiones, se desvían hacia la derecha de la trayectoria radial (al revés que las agujas de un reloj); se forman así los ciclones o borrascas (figura 63). Inversamente, cuando las masas de aire parten de un punto de altas presiones, dan origen, al desviarse de sus trayectorias radiales, a una circulación en sentido contrario a la de las borrascas, es decir, como las agujas del reloj, a esta circulación se la denomina anticiclónica. En el polo sur, estas fuerzas de Coriolis y las desviaciones que producen a las masas de aire en movimiento también existen, pero, como es de esperar, serán en sentido contrario. Los aires ciclónicos se moverán en zonas del hemisferio sur con un giro como el de las agujas del reloj y los aires anticiclónicos al revés.

No solamente el aire sufre estas fuerzas. Los ríos del hemisferio norte erosionan más la orilla que se encuentra al este que la orilla contraria. Del mismo modo, los carriles de los trenes en las rectas sufren un desgaste mayor en la parte interna del carril situado más al oeste.

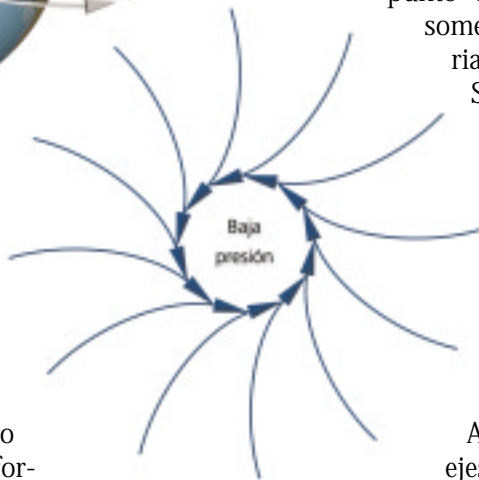


Figura 63

EL BALANCEO DE LOS BUQUES

La condición general de equilibrio es que el **centro de gravedad** (G) y el **centro de empuje** (O) estén en la misma vertical. Para un sólido en reposo sobre una superficie, el empuje es la reacción del suelo contra el cuerpo y, por tanto, de valor constante, siendo la situación muy clara, ya que el centro de empuje y el centro de gravedad ocupan posiciones fijas.

Un buque tiene su peso constante y su centro de gravedad será un punto que depende de su fabricación y de la situación de la carga, pero su centro de empuje (fuerzas de Arquímedes) depende de la parte sumergida. Al apartarse un cuerpo flotante de su posición de equilibrio, el centro de gravedad no modifica su posición en el cuerpo, pero su centro de empuje (centro de gravedad de la parte sumergida) se desplaza, al variar la forma de la parte sumergida en el líquido (figura 65). El par de fuerzas que se origina entre el **peso** (P), y el **empuje** (E) ha de ser tal que rectifique la posición del cuerpo y tienda a que recupere la verticalidad. Para ello es indispensable que el centro de gravedad esté situado a una altura menor que el centro de empuje. El par de fuerzas formado cambiará de sentido una vez el buque haya sobrepasado la verticalidad, iniciando así un nuevo ciclo.

Figura 64



EL PÉNDULO DE FOUCAULT

Es un péndulo de gran masa y longitud, aplicado a un cojinete que tiene permitido el movimiento de rotación para evitar retorcer el cable (generalmente de acero para que tenga una gran masa) (figura 64). Si se hace oscilar este péndulo, sus oscilaciones serán visibles durante mucho tiempo, debido a la inercia que le proporciona la masa. Si se hace girar según un eje vertical la base del péndulo, se podrá observar que no varía su plano de oscilación, debido a que su gran inercia no permite el giro. Si se deja en reposo, el plano de oscilación de este péndulo va girando en sentido contrario al del giro de la Tierra (del este hacia el oeste), de manera que su giro es completo a las 24 horas de iniciado el movimiento. Este giro es debido a que la Tierra se comporta como una plataforma giratoria que da una vuelta cada día de oeste a este, y el péndulo, con su masa (y, por tanto, su inercia) no varía su plano de oscilación; un observador en reposo aparente, pero que en realidad gira con la Tierra, ve que el péndulo ha variado su plano de oscilación.

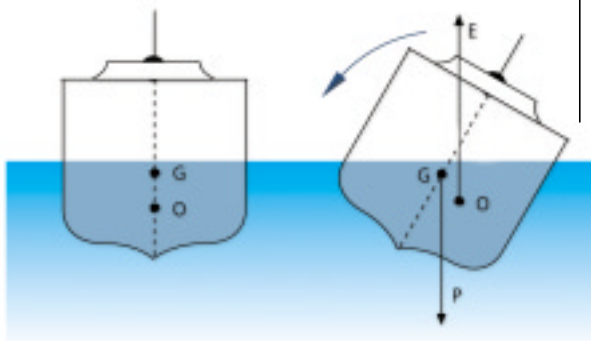


Figura 65

AUTOEVALUACIÓN

27. ¿La mecánica es una ciencia exacta?
28. ¿El movimiento que sufre un cuerpo lanzado oblicuamente, es rectilíneo?
29. Si se lanza un cuerpo oblicuamente a una velocidad determinada para alcanzar un objetivo, ¿hay un solo ángulo para alcanzarlo?
30. Si lanzáramos desde el Himalaya dos proyectiles que se desplazaran en línea recta, uno hacia el oeste y otro hacia el este, ¿cuál de los dos volvería antes al punto de partida?
31. ¿Cómo se ha de colocar la carga de un buque para mejorar su estabilidad?
32. Si se lanza un proyectil a una velocidad de 120 m/s con una inclinación de 60° , ¿cuál será la altura máxima que alcanzará?, ¿a qué distancia del punto de salida chocará con el suelo si éste es llano y horizontal?



ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

La electricidad, juntamente con el magnetismo, forma parte de una disciplina más amplia denominada electromagnetismo, la cual, como su nombre indica, trata de la teoría unificada de los fenómenos eléctricos y magnéticos (figura 66).



Figura 66
Cuando en la atmósfera se crea una gran diferencia de potencial, que llega a ser de centenares de miles de voltios, se produce una enorme descarga eléctrica.

CARGAS ELÉCTRICAS

Las cargas eléctricas, tanto en reposo como en movimiento, determinan las propiedades de la electricidad, así como todos los fenómenos asociados a ella. La materia, clásicamente, está compuesta por **átomos**, y éstos, a su vez, por **núcleos** (formados por **neutrones** y **protones**) y **electrones** que los rodean. Asimismo, se pueden constituir sistemas en

los que haya un exceso de electrones (con carga negativa) o de protones (con carga positiva). En la materia ordinaria el número de protones y electrones es igual, motivo por el cual los átomos son neutros y no presentan efectos eléctricos. Sin embargo, cuando se añaden cargas positivas o negativas, el efecto neto da lugar a fenómenos eléctricos. De todas maneras, lo lógico sería hablar de ganar electrones, con lo que la materia queda cargada negati-

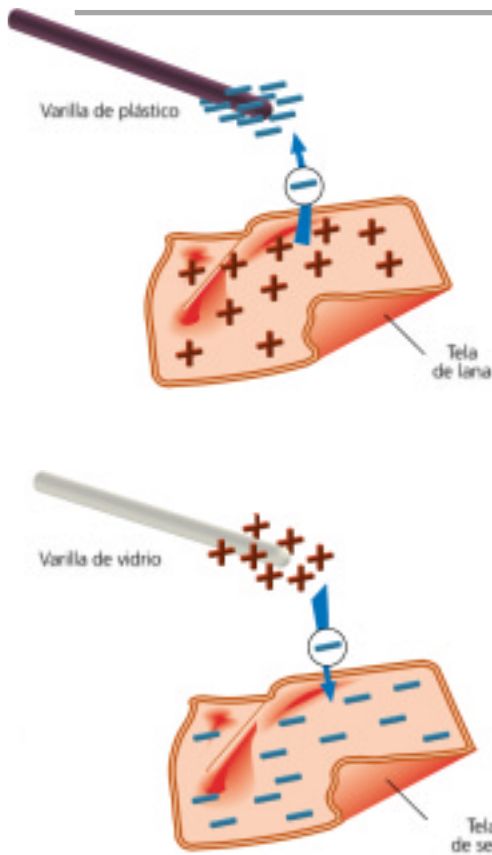


Figura 67

vamente, o de perderlos, con lo que queda cargada positivamente, más que de ganar carga positiva, ya que ésta, al estar en el núcleo, es más inaccesible. Existe una gran variedad de materiales, característicamente los metales, que disponen en su estructura atómica de electrones libres que les hacen buenos **conductores** de la corriente eléctrica (y del calor). Por el contrario, existen otros que no disponen de dichos iones y electrones y que reciben el nombre de **aislantes**, debido a que normalmente no conducen la corriente.

Uno de los primeros efectos eléctricos conocidos fue el de la **electricidad estática**. Si se frota una varilla de plástico con una tela de lana, ésta queda cargada negativamente, porque toma electrones de la lana que queda cargada positivamente. En cambio, si se frota una varilla de vidrio con una tela de seda, la varilla adquiere carga positiva y la seda queda cargada negativamente. En ambos casos se produce un paso de «carga» de uno al otro, con lo que se atraen mutuamente (figura 67). Asimismo, si se

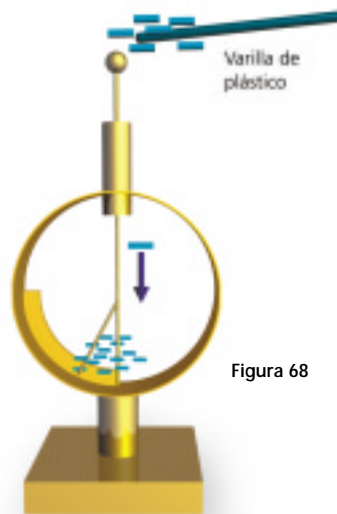


Figura 68

aproximan dos varillas de plástico frotadas de igual forma con un trapo, se observa que éstas se repelen, de lo que se deduce que las cargas de igual signo se repelen, mientras que las de distinto signo se atraen. Por convenio se ha establecido llamarlas carga positiva y negativa, y asignar a la positiva la que corresponde a la varilla de plástico.

La **inducción electrostática** se presenta por influencia de un cuerpo cargado sobre otro que en conjunto es neutro. Las cargas de uno atraen a las cargas de signo opuesto de la sustancia neutra haciendo que ésta se polarice. Para determinar cargas pequeñas se emplea un instrumento llamado electroscopio (figura 68). Cuando se pone en contacto la sustancia cargada con dicho instrumento, las placas metálicas de su interior adquieren cargas parecidas, motivo por el cual se repelen, separándose mutuamente. El fenómeno de la inducción electrostática tiene importancia en un dispositivo tan común como el pararrayos. El proceso de la descarga del rayo se verifica del modo siguiente: cuando las nubes (cargadas negativamente) pasan por encima de un edificio, inducen en el tejado de éste cargas positivas. En esta situación existe el peligro de que se produzca una descarga (rayo) entre la nube y el edificio. Sin embargo, si el edificio dispone de pararrayos, la carga positiva inducida en su techo se concentra con densidad muy alta en la barra metálica que lo compone. De este modo, si se llega a producir la descarga, ésta pasará a través del pararrayos y será conducida por el cable que lo une a tierra, sin dañar el edificio.

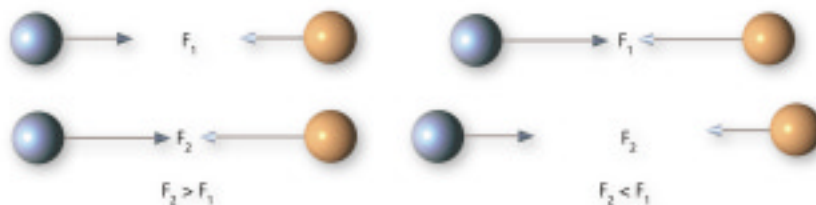


Figura 69

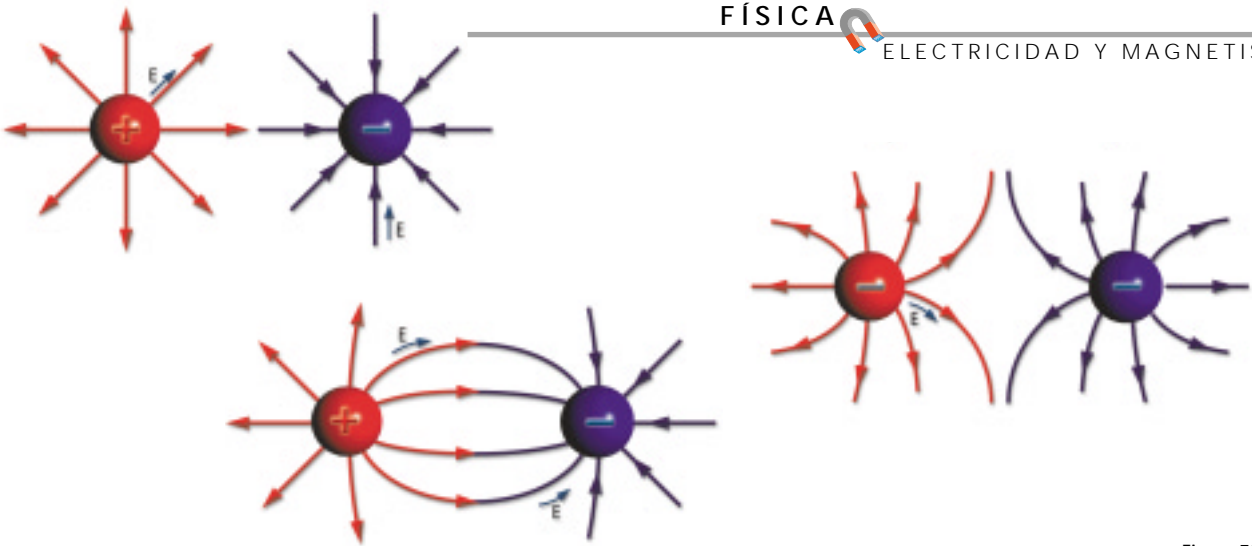


Figura 70

CAMPO ELÉCTRICO

Los campos eléctricos son los responsables de que existan las fuerzas electrostáticas repulsivas y atractivas entre los objetos cargados. La fuerza entre las cargas se rige por la **ley de Coulomb**. Dicha ley afirma que la fuerza es proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que media entre ellas (figura 69). El medio desempeña también un papel importante, ya que si las cargas se encuentran inmersas en un medio que

sufre polarización eléctrica, se ven parcialmente aisladas, propiedad que recibe el nombre de **permitividad**. El vacío, dado que no puede sufrir polarización, tiene el valor más bajo posible de permitividad, llamada permitividad en el vacío. Por regla general las sustancias iónicas presentan un valor más alto de permitividad que las no iónicas.

El concepto de campo eléctrico es muy útil en cuanto a la representación de los efectos en las inmediaciones de distribuciones de carga. Por convenio se considera que la dirección del campo eléctrico es la de la fuerza que éste ejerce sobre una carga positiva de prueba situada en él, dependiendo su intensidad de la magnitud de dicha fuerza. Así, por ejemplo, una carga puntual crea a su alrededor un campo cuya fuerza disminuye con el alejamiento de ella. La representación del campo eléctrico se realiza mediante las denominadas **líneas de campo** (figura 70). En el caso de una carga puntual las líneas de campo llevan una dirección radial, en sentido hacia la carga, si ésta es negativa, y hacia fuera, si es positiva.

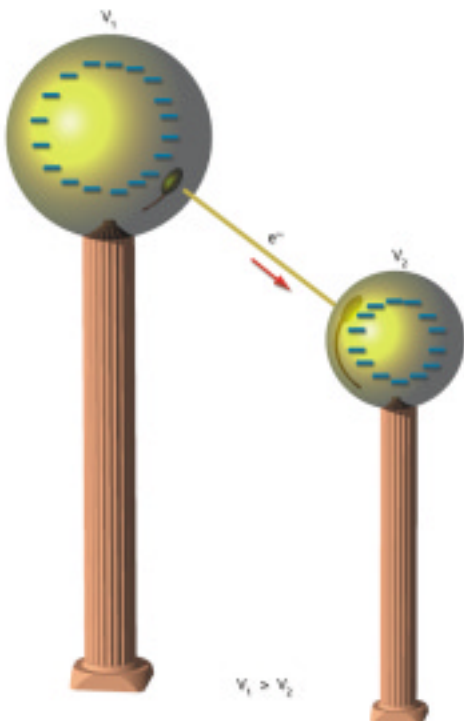


Figura 71

POTENCIAL ELÉCTRICO

Si se conectan dos conductores, uno cargado y uno descargado, se verifica un paso de carga entre ellos, ya que el conductor cargado reduce su energía potencial, transfiriéndola al descargado (figura 71). Esto se expresa diciendo que el primer conductor tiene un **potencial** más alto que el segundo, y que entre ellos existe una **diferencia de potencial**. Las cargas fluyen de uno al otro hasta que ambos se encuentran al mismo potencial. Por convenio se establece que la

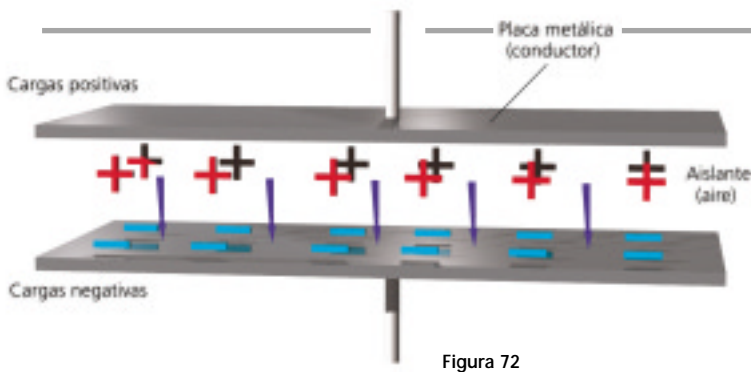


Figura 72

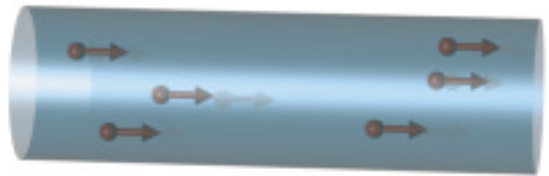


Figura 73

Tierra tiene potencial cero, motivo por el cual cualquier conductor conectado a ella adquiere el mismo potencial, es decir, queda «descargado».

Un conductor grande es capaz de retener, para un determinado potencial, una mayor cantidad de carga que uno pequeño, propiedad que recibe el nombre de **capacitancia**. La cantidad de carga que es posible almacenar depende por tanto de la capacidad del conductor y del potencial a que se encuentre.

Un dispositivo de estas características recibe el nombre de **condensador** (figura 72). Este dispositivo tiene conductores en forma de placas metálicas entre los que se sitúa una sustancia capaz de ser polarizada, llamada dieléctrico o aislante, cuya permitividad debe ser lo mayor posible. Asimismo, debe ser aislante para que las cargas positiva y negativa, almacenadas, respectivamente, en ambas placas, no pasen a la otra. Para establecer una comparación entre la capacidad del condensador con dieléctrico y sin él se emplea el concepto de constante dieléctrica o permitividad relativa.

CORRIENTE ELÉCTRICA

La **corriente eléctrica** se establece por el flujo continuo de cargas que discurre por el interior de un conductor. La cantidad de electrones o iones que pasa por el conductor (**intensidad** de la corriente) depende de la diferencia de potencial establecida entre sus extremos (figura 73). Se mide en amperios y depende asimismo de la resistencia que ofrezca el conductor al paso de la corriente. La **resistencia**, que se mide en ohmios, ofrece una idea de las dificultades de los electrones y los iones para moverse por el conductor. Finalmente, la diferencia de potencial o **voltaje** establece la energía potencial electrostática entre los extremos del conductor.

El **circuito** más elemental que podemos establecer es conectar una resistencia a los bornes de una batería mediante un par de cables de cobre. De este modo se establece un paso de cargas negativas desde el borne negativo, a través de los cables, y la resistencia hasta el borne positivo de la batería; o, lo que es equivalente, un paso de cargas positivas a través de los mismos elementos hasta el borne negativo (figura 74). Por convenio se ha establecido que el paso de la corriente sea del borne positivo al negativo fuera de la batería, y al revés por el interior de ésta. La diferencia de potencial que suministra una batería recibe el nombre de **fuerza electromotriz** (f.e.m.), y se mide en voltios. Cuanto mayor es la f.e.m., tanto mayor es la intensidad de la corriente. Las resistencias requieren una diferencia de potencial tanto mayor cuanto mayor es su oposición a permitir el paso de la corriente.

La corriente eléctrica muestra dos tipos de comportamiento diferenciado en cuanto al sentido en que recorre el circuito. De este modo, en general se dis-

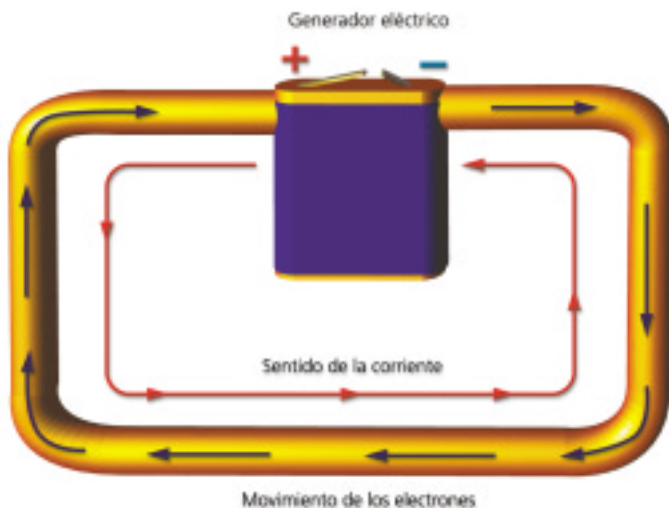


Figura 74

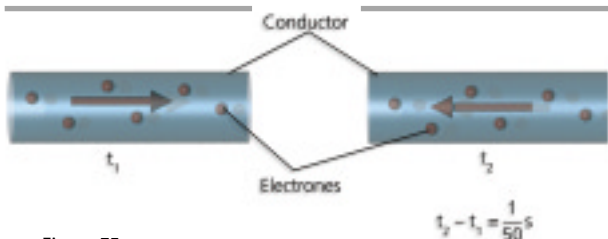


Figura 75

tingue entre corriente **continua** y **alterna** (figura 75). La primera es la que recorre el circuito siempre en idéntico sentido. La segunda es la que cambia el sentido de recorrido del circuito varias veces por segundo y presenta una intensidad determinada, independientemente del sentido del recorrido del circuito. Así, la corriente doméstica en los países europeos es alterna de 50 Hz (hercios), lo que significa que la corriente cambia su sentido 50 veces cada segundo. La corriente alterna permite el transporte de energía a grandes distancias con menores pérdidas en forma de calor. En las líneas de transporte la diferencia de potencial es enorme, de cientos de miles de voltios. Para su introducción en las casas o en las industrias se deberá disminuir esta diferencia de potencial hasta niveles no peligrosos mediante transformadores de potencial. La utilización de la energía en los denominados aparatos electrónicos suele ser de corriente continua, para ello se dispone de unos aparatos llamados **rectificadores** que transforman la corriente alterna en continua. Los rectificadores basan su efecto en unos componentes electrónicos que reciben el nombre de **diodos** que sólo permiten el paso de corriente en un sentido. Del diodo emerge una corriente que todavía no es continua ya que varía continuamente de intensidad. Mediante una asociación de diodos y unos filtros compuestos de condensadores se logra amortiguar la fluctuación de la intensidad y obtener de esta forma corriente continua.

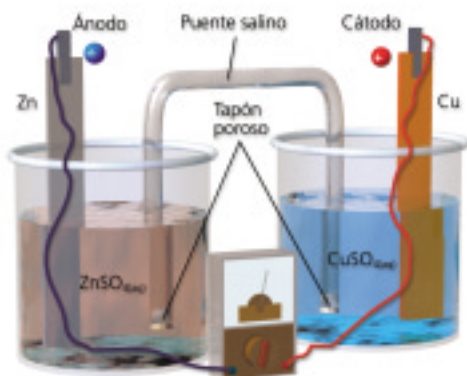


Figura 76

LA PILA ELÉCTRICA

Las fuentes de voltaje de corriente continua reciben el nombre de **pilas** o **baterías**. Su funcionamiento se basa en la transformación de energía química en energía eléctrica mediante la inversión del proceso de la electrólisis. De un modo más preciso, el concepto de batería se aplica a conjuntos de pilas iguales. Las pilas consumen poco a poco el combustible químico generando electricidad. Entre éstas destaca la pila Daniell, formada por dos electrodos de cobre o cinc sumergidos en una disolución de ácido sulfúrico que hace las veces de electrólito (figura 76). El proceso mediante el cual se genera energía eléctrica se basa en la disolución lenta del cinc para dar iones de cinc y liberar electrones que hacen que dicho electrodo adquiera carga negativa. Por otro lado, en el electrodo de cobre los iones de hidrógeno del ácido sulfúrico se neutralizan mediante la captura de electrones del cobre. Esto da lugar a la liberación de hidrógeno gaseoso y a que el electrodo se cargue positivamente. Si se unen ambos electrodos mediante un conductor, circula una corriente desde el electrodo positivo (**cátodo**) hacia el negativo (**ánodo**). Existen otros tipos de pila, como la pila seca de Leclanché (empleada en radios, linternas, etc.) (figura 77), o la llamada pila de Weston, que emplea el cadmio como electrodo. Todas ellas tienen una vida limitada determinada por el fin del proceso de oxidación o reducción que se verifica en su interior. La fuerza electromotriz de las pilas no depende de su tamaño, sino de los elementos empleados como electrodos y de la sustancia utilizada como electrólito. Sin embargo, el tamaño de la

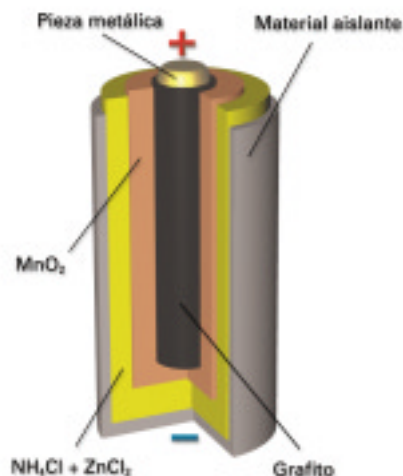


Figura 77

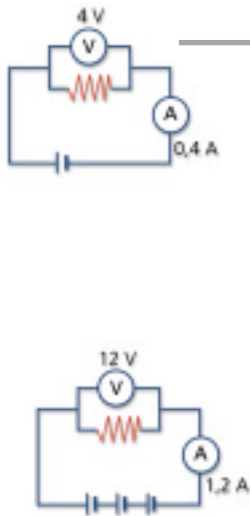


Figura 78



Figura 79

Las pilas y baterías son capaces de transformar la energía química en energía eléctrica con un rendimiento mucho mayor (de aproximadamente un 90 %) que cualquier otro de los procesos de obtención de esta energía, si bien presentan el inconveniente de su elevado coste.

LEY DE OHM

La diferencia de potencial se relaciona con la intensidad

de la corriente y la resistencia mediante la **ley de Ohm** (figura 78). Sin embargo, si bien todos los conductores ofrecen una resistencia al paso de la corriente, no todos cumplen estrictamente esa ley.

Incluso cuando un conductor no conduce corriente eléctrica, los electrones libres que hay en su seno se mueven a lo largo de él. Cuando se le aplica una diferencia de potencial dichas cargas suman una cierta velocidad a la del movimiento al azar antes mencionado. De todos modos, estas velocidades son relativamente bajas y no explican la rapidez con la que se produce el paso de la corriente eléctrica, que se debe al hecho de que la señal eléctrica pasa directamente de un electrón a otro durante sus choques mutuos, lo que permite que la señal se propague a unos 300 millones de metros por segundo.

TRABAJO Y POTENCIA DE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

El trabajo consumido por unidad de tiempo nos da la potencia del circuito. También podemos hallar la potencia al multiplicar la diferencia de potencial por la intensidad de la corriente, es decir, si queremos hallar la potencia de una instalación doméstica, o bien la que consume un electrodoméstico, basta multiplicar el potencial a que va conectado por la intensidad que circula a través de él. La

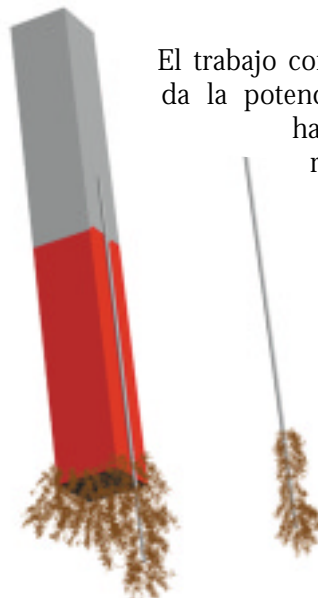


Figura 80

pila sí que determina su capacidad. Se han desarrollado las denominadas **pilas de combustible**, en las que se reponen constantemente con un combustible químico los electrodos que van agotándose, lo que les confiere una duración prácticamente ilimitada. Así, por ejemplo, mediante la inversión de la electrólisis del agua, se logra la formación de agua por combinación de hidrógeno y oxígeno y la producción de corriente.

ACUMULADORES

Si se emplean en las pilas determinados electrodos y electrolitos, es posible recuperar la pila hasta su estado original haciendo que la corriente circule por ella en sentido opuesto, para lo que se emplea una fuente externa de voltaje.

Las pilas capaces de regeneración de este modo reciben el nombre de **acumuladores** o baterías. Los dos tipos fundamentales son el de plomo y el alcalino de hierro-níquel. El primero emplea el ácido sulfúrico como electrolito, siendo sus electrodos de óxido de plomo y plomo. Son capaces de generar una f.e.m. de 2 voltios. Si se disponen en batería conectadas en serie 6 pilas de este tipo, el conjunto es capaz de producir 12 voltios con intensidades de hasta 200 amperios (como las que se emplean, por ejemplo, en las baterías de los automóviles). El segundo tipo (hierro-níquel) emplea una solución de hidróxido de potasio como electrolito y un cátodo de hidróxido de níquel, así como un ánodo de hierro. La ventaja de las baterías alcalinas, a pesar de generar corrientes de voltajes más bajos, es que tienen una duración más prolongada y son más ligeras y resistentes.

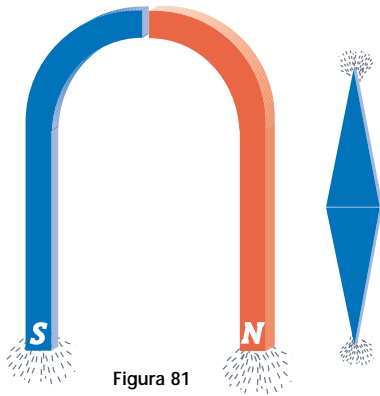


Figura 81

unidad de potencia en el Sistema Internacional es el vatio, siempre que el potencial se mida en voltios y la intensidad en amperios. Otra unidad de potencia es el caballo de vapor (CV), que equivale a 735 vatios (W). Hay que recordar que 1 kW (1 kilovatio) es igual a 1.000 W. Si tenemos en cuenta que $W = P \cdot t$, podemos encontrar una nueva unidad para la medida del trabajo o de la energía y que, además, es muy utilizada por las compañías eléctricas, es el kW · h (kilovatio por hora o kilovatio-hora): $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 36 \cdot 10^5 \text{ julios}$ (figura 79). Las compañías eléctricas utilizan esta unidad porque el julio es una medida muy pequeña para medir el consumo energético doméstico.

IMANES

Existe en la naturaleza un mineral llamado magnetita que tiene la propiedad de atraer a las limaduras de hierro. A este fenómeno, que se conoce desde muy antiguo, se le llama **magnetismo**, y la magnetita que atrae a las limaduras de hierro es un **imán natural**. Los imanes atraen con gran fuerza al hierro. También atraen a otros metales, como níquel, cobalto y aleaciones de níquel, aluminio, cobre, etc. Sin embargo, la fuerza con que un imán atrae al hierro es mucho mayor que la fuerza con que atrae al níquel o al cobalto (figura 80). A todos los demás metales y no metales, el imán en condiciones ordinarias no puede atraerlos sensiblemente. Aquellas sustancias que

muestran efectos magnéticos se les conoce como **ferromagnéticas**.

En un imán existen zonas que atraen con más fuerza que otras a las limaduras de hierro. Son los llamados **polos** magnéticos del imán. Todo imán tiene dos polos magnéticos, conocidos como polo norte y polo sur (figura 81). Si colgamos un imán recto por su parte central mediante un hilo, un polo magnético se orienta hacia el norte geográfico y el otro se orienta hacia el sur geográfico. Esta propiedad se usa en la brújula, aparato que es conocido desde la antigüedad. Se utiliza en Europa desde la Edad Media para poder orientarse, sobre todo en la navegación (figura 82).

Figura 82



Los polos iguales se repelen, mientras que los diferentes se atraen, siendo tanto mayor la fuerza de atracción o repulsión cuanto mayor es la fuerza de los polos y cuanto más próximos están entre sí (figura 83). La fuerza magnética es inversamente proporcional al cuadrado de las distancias.

CAMPO MAGNÉTICO

Asimismo, un imán genera un campo a su alrededor cuya intensidad es máxima en sus polos. Dicha región recibe el nombre de **campo magnético**. Al igual que en el caso del campo eléctrico, el campo puede representarse mediante las denominadas líneas de campo, que indican su fuerza y sentido

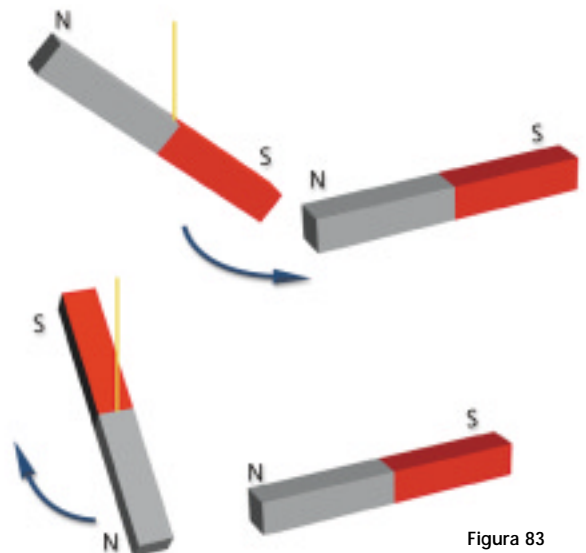


Figura 83

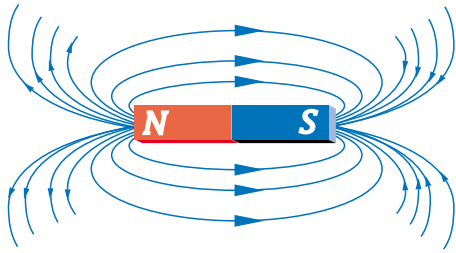
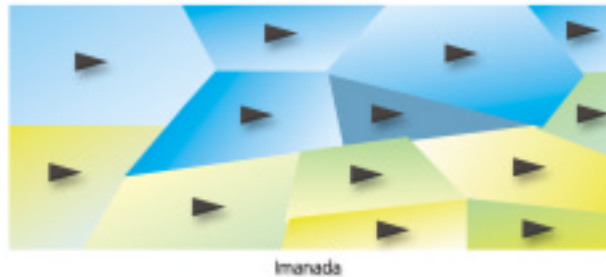


Figura 84



Figura 85



(figura 84). Allí donde éstas están más próximas entre sí, el campo es más intenso, mientras que en los lugares donde están más separadas, el campo es más débil. Las flechas sobre las líneas de campo indican el sentido en que se movería un polo norte de prueba situado en dicho punto. El polo sur lo haría en sentido contrario. Todos los imanes tienen polo norte y polo sur, y hasta el momento no se ha detectado el monopolo magnético.

Las sustancias ferromagnéticas presentan unas características magnéticas como consecuencia de su propia estructura atómica. El rápido giro de los electrones alrededor del núcleo atómico hace que cada uno de ellos origine un diminuto campo magnético, dado que son portadores de carga. El efecto global se anula, por regla general, en todas las sustancias, y sólo en aquellas que no lo hace se presentan efectos magnéticos. Cuando el material ferromagnético no está imanado por un campo externo, la orientación de los imanes internos es al azar, anulándose entre sí. Sin embargo, la imanación de dichos materiales hace que los dominios

se alineen con el campo externo, lo que da lugar a un efecto total de imanación (figura 85).

La Tierra tiene un campo magnético que hace, por ejemplo, que una barra imanada que gire libremente se oriente en el sentido de sus líneas de campo (figura 86). Su forma es semejante a la de un imán recto que tuviese su polo sur en el hemisferio boreal y el polo norte en el austral,

estando asimismo el eje del imán ligeramente inclinado respecto del eje de rotación del planeta, que pasa por ambos polos geográficos. El ángulo entre el polo norte verdadero o geográfico y el polo norte magnético se llama **declinación** magnética (figura 87), y su valor varía para los diversos puntos de la Tierra. Los polos magnéticos del planeta estuvieron invertidos completamente en el pasado. Por el momento desconocemos la razón por la cual se produce el movimiento de los polos magnéticos.

Además, el campo magnético terrestre no es paralelo a la superficie del planeta, salvo en el llamado ecuador magnético. La diferencia angular existente entre el campo magnético y la horizontal en el lugar de observación recibe el nombre de **inclinación magnética** (figura 88).

El origen del magnetismo terrestre no está del todo claro. El núcleo de la Tierra, a pesar de contener gran cantidad de hierro, está fundido, motivo por el cual no puede estar imanado. El estudio del campo magnético de los planetas y del Sol ha permitido establecer sus composiciones.

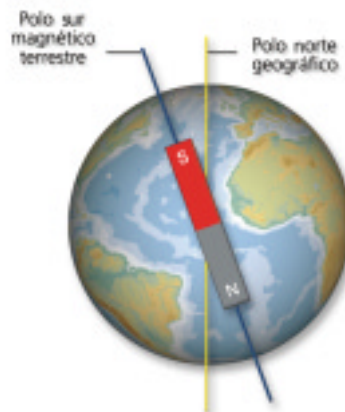


Figura 86

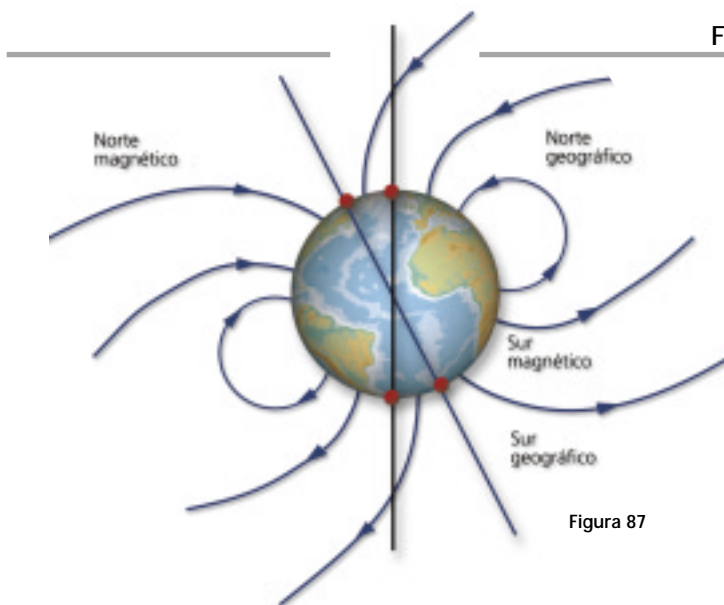


Figura 87

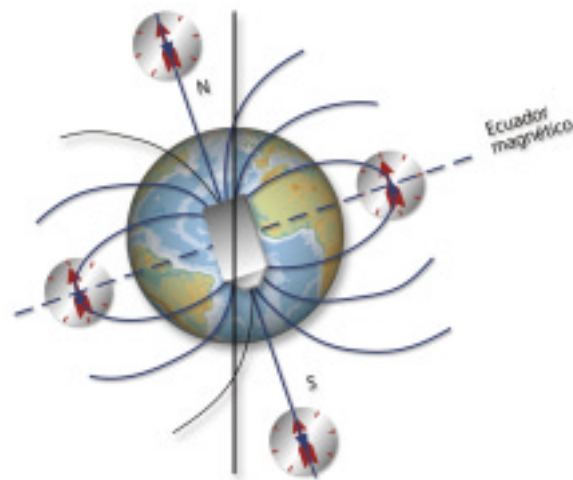


Figura 88

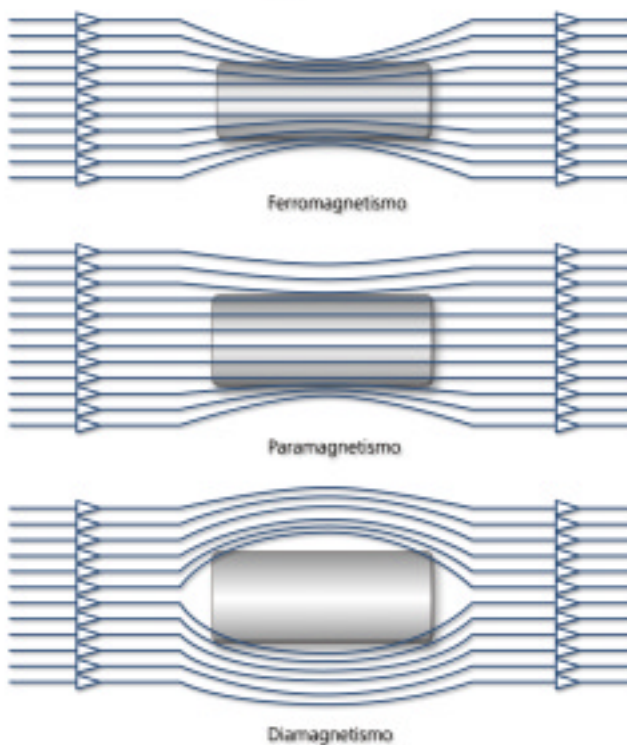


Figura 89

TIPOS DE COMPORTAMIENTO MAGNÉTICO

Existen diversos tipos de magnetismo: el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo (figura 89). En los **materiales diamagnéticos** la disposición de los electrones de cada átomo es tal que se produce una anulación global de los efectos magnéticos. Sin embargo, si el material se introduce en un campo inducido, la sustancia adquiere una imanación

débil y en sentido opuesto al campo inductor. Si se sitúa una barra de material diamagnético en el interior de un campo magnético uniforme e intenso, ésta se dispone transversalmente respecto de aquél. Los **materiales paramagnéticos** no presentan la anulación global de efectos magnéticos, por lo que cada átomo que los constituye actúa como un pequeño imán. Sin embargo, la orientación de dichos imanes es en general arbitraria, y el efecto global se anula. Asimismo, si el material paramagnético se somete a la acción de un campo magnético inductor, el campo magnético inducido en dicha sustancia se orienta en el sentido del campo magnético inductor. Esto hace que una barra de material paramagnético suspendida libremente en el seno de un campo inductor, se alinee con éste. El magnetismo inducido, aunque débil, es suficientemente intenso como para imponerse al efecto diamagnético. Para comparar los tres tipos de magnetismo se emplea la razón entre el campo magnético inducido y el inductor. Ésta recibe el nombre de **susceptibilidad**, y su valor es inferior o igual a -10^{-6} para los materiales diamagnéticos, entre 10^{-5} y 10^{-3} para los paramagnéticos, y superior a 10^{-3} para los ferromagnéticos, lo que nos da una idea de la intensidad de cada uno de los efectos.

La única sustancia natural que se comporta como un imán es el mineral de hierro llamado magnetita. El resto de los imanes debe obtenerse a partir de **materiales ferromagnéticos** mediante diversos procesos de imanación. Una de las formas es situar el material

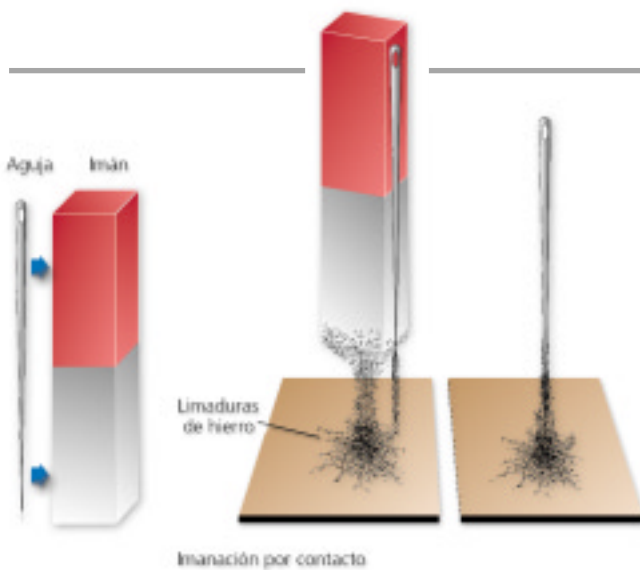


Figura 90

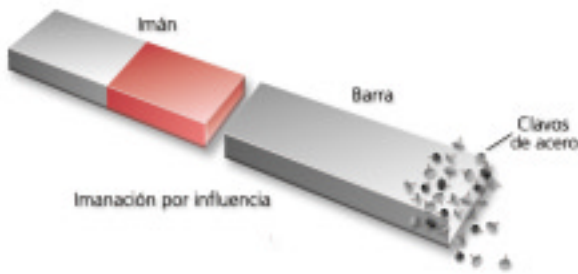


Figura 91

ferromagnético junto a un imán muy intenso (figura 90). Este método induce tan sólo un campo débil. Otro método consiste en situar el material ferromagnético dentro de un solenoide. La corriente que circula por él genera un campo magnético intenso que, a su vez, induce un campo magnético en el material. Asimismo, existen materiales que, una vez imanados, conservan el magnetismo (por ejemplo, el acero), mientras que otros lo pierden cuando deja de aplicarse el campo magnético (hierro dulce) (figura 91).

Cuando una sustancia ferromagnética no imanada se sitúa en el seno de un campo magnético que se invierte constantemente, la sustancia recorre muchos ciclos magnéticos en un segundo. En esta situación el campo magnético inducido en ella queda rezagado respecto del campo magnético inductor, fenómeno que recibe el nombre de **histéresis**. La representación gráfica de este fenómeno recibe el nombre de ciclo de histéresis y permite establecer algunas propiedades de los materiales ferromagnéticos. Cuando el material está magnéticamente satura-

do, la fuerza del campo magnético en el punto en que el ciclo de histéresis corta al campo magnético inducido recibe el nombre de **remanencia**, que expresa la intensidad del magnetismo residual. Asimismo, la **coercitividad** o **fuerza coercitiva** representa la intensidad del campo magnetizador necesario para eliminar completamente el campo remanente, por lo que brinda una idea de la capacidad del material para conservar el magnetismo adquirido.

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CORRIENTE

El movimiento de las cargas eléctricas es la causa de la aparición del magnetismo, motivo por el cual las corrientes eléctricas generan campos magnéticos cuya intensidad es tanto mayor cuanto mayor es la intensidad de la corriente.

Oersted observó experimentalmente en 1820 que la corriente eléctrica continua era capaz de orientar una aguja magnética puesta en sus cercanías (figura 92). Al situar una aguja magnética debajo de una corriente, se orienta de forma que aquélla queda perpendicular a la corriente. Se cumple la siguiente regla: «Situada la mano derecha sobre el hilo conductor, de forma que la corriente penetre por la muñeca y salga

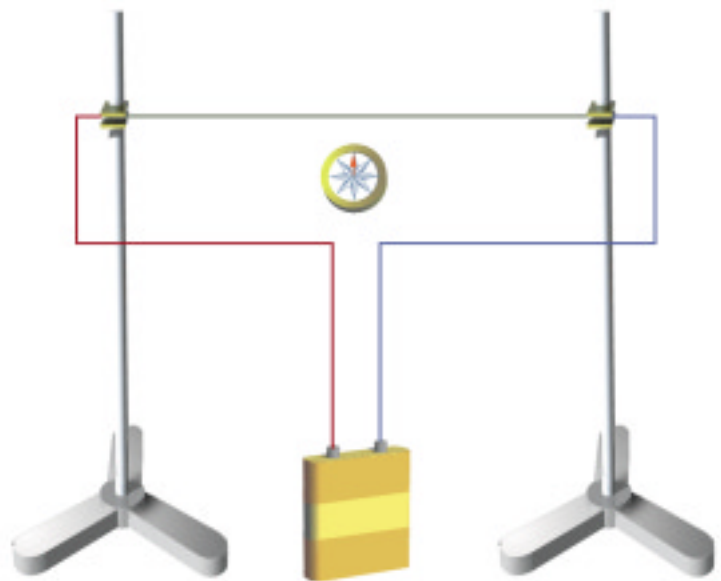


Figura 92

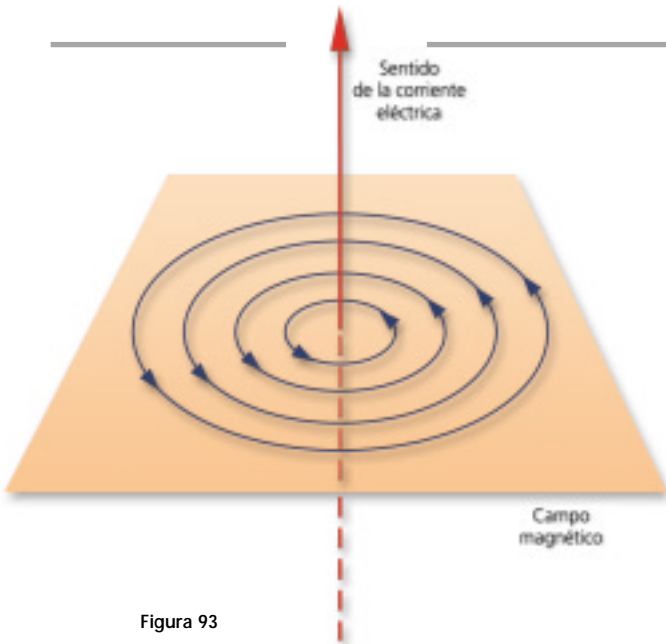


Figura 93

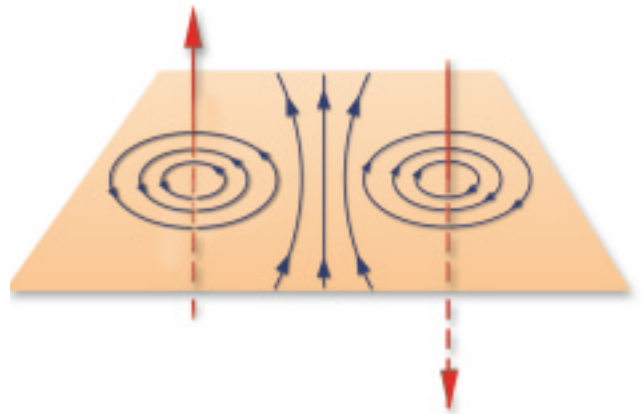


Figura 94

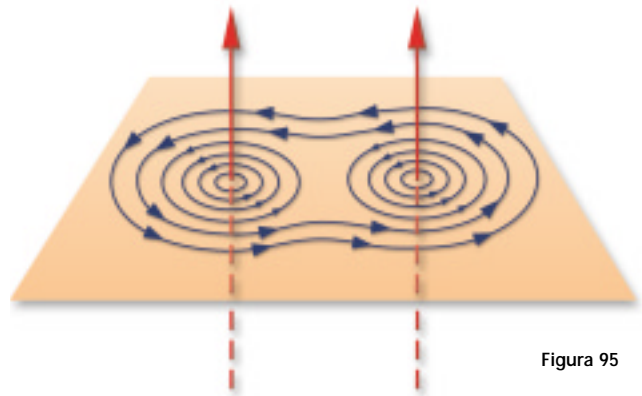


Figura 95

por los dedos, el dedo pulgar extendido indica el sentido del polo norte de la aguja». Podríamos apreciar la forma del campo magnético que crea una corriente rectilínea, haciendo circular por el hilo una gran intensidad. Atravesando perpendicularmente con el hilo un cartoncillo en el que se coloca una aguja imanada, situándola en varios puntos para ver su orientación, podríamos dibujar las líneas de fuerza, lo que permitiría conocer la dirección y sentido del campo magnético (figura 93). Encontraríamos que las líneas de fuerza serían circulares y tendrían el mismo sentido del giro que un sacacorchos que avanzase como la corriente. «El campo magnético creado por una corriente rectilínea presenta líneas de fuerza circulares, situadas en el plano perpendicular al hilo conductor y cuyo sentido nos viene dado por la regla de la mano derecha.» Este campo magnético sería vectorial, y en cada punto podríamos definir un vector llamado **intensidad** del campo, tangente a las líneas de fuerza y con el mismo sentido que éstas. El campo magnético creado por la corriente que circula por un alambre depende de la forma de éste (figuras 94 y 95), y una de las aplicaciones más importantes de este efecto es el solenoide, que permite obtener campos magnéticos de gran uniformidad en cuanto a su intensidad y sentido. El solenoide está constituido por un alambre arrollado sobre un cilindro (figura 96), y se comporta como un imán, mostrando un polo norte y un polo sur en ambos extremos (figura 97).

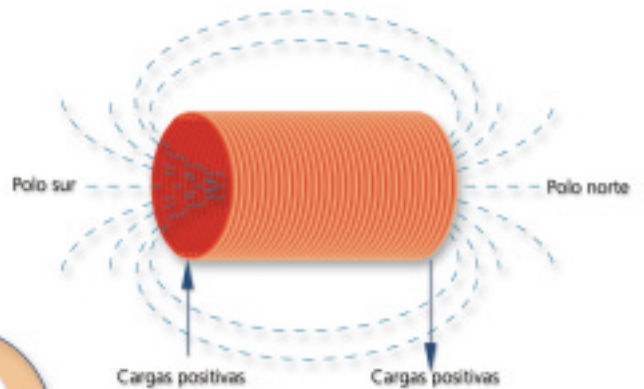


Figura 96

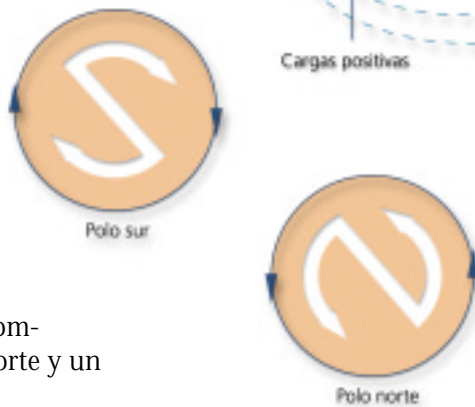


Figura 97

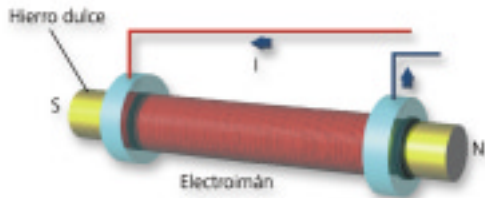


Figura 98



Figura 99

ELECTROIMANES

Los materiales magnéticos duros presentan una coercitividad más elevada, por lo que son más adecuados para la construcción de imanes permanentes, mientras que los suaves se usan en dispositivos tales como los electroimanes. El **electroimán** se compone de un núcleo de hierro dulce envuelto por un solenoide (figura 98). Cuando la corriente circula por el solenoide, aparece un campo magnético muy intenso en el núcleo, que desaparece cuando se corta el paso de la corriente. Asimismo, los materiales magnéticos suaves se emplean como núcleos de transformadores, ya que en ellos el campo magnético debe invertirse muchas veces por segundo.

Las aplicaciones de los imanes y los electroimanes son muy variadas. Las grúas magnéticas poseen un potente electroimán y se emplean en fábricas, puer-

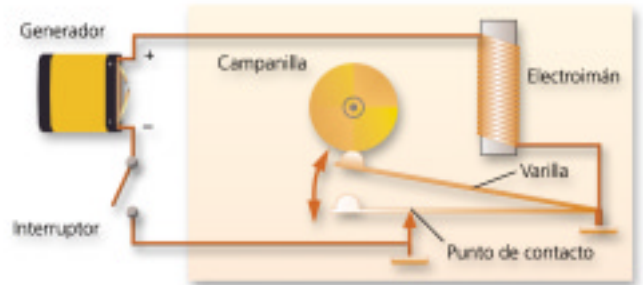


Figura 100

tos y estaciones para mover piezas de hierro (figura 99). Los electroimanes se utilizan también para separar materiales de hierro que se hallan entre otros elementos. Otra aplicación importante es la del timbre eléctrico (figura 100). Se compone fundamentalmente de un electroimán pequeño en herradura; delante de sus polos puede oscilar una lámina de hierro dulce que golpea la campanilla cuando se cierra el circuito. Pero al desplazarse la laminilla, se separa del tornillo y se interrumpe el paso de corriente, por lo que el electroimán se desmagna y ya no la retiene. En este momento un resorte atrae la lámina y la pone de nuevo en contacto con el tornillo, restableciéndose así el circuito, y el ciclo se repite. Otras aplicaciones de los electroimanes son algunos aparatos de medida, como los amperímetros y los voltímetros.

MOTORES ELÉCTRICOS

La corriente eléctrica que circula a través de un alambre situado en el interior de un campo magnético genera una fuerza que lo desplaza.

Este efecto, llamado **efecto motor**, es el que permite la existencia de los motores eléctricos. La fuerza generada depende de la intensidad del campo magnético y de la corriente que pasa por el conductor, así como de la longitud de éste y de su orientación dentro del campo.

Este principio se emplea asimismo en los galvanómetros, que son los instrumentos utilizados para la medición de la intensidad de la corriente y el voltaje. Cuando un conductor se desplaza en el seno de un campo magnético se produce un efecto llamado **inducción electromagnética**, que da lugar a la aparición de una corriente eléctrica. Constituye una forma de producción de corriente eléctrica a partir de

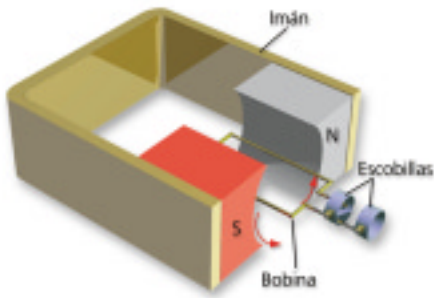


Figura 101

trabajo mecánico (figura 101). En este caso la diferencia de potencial inducida depende de la intensidad del campo magnético, la longitud del conductor que se mueve en su interior y la velocidad con la que lo hace. Asimismo, depende de la orientación del conductor en el campo y de la dirección del movimiento de éste. Basándose en esto se construyen los **dinamos**, capaces de transformar energía mecánica en eléctrica haciendo girar una serie de espiras en un campo magnético.

CORRIENTE ALTERNA

En los temas anteriores se han comentado los fenómenos que se producen en la inducción electromagnética (figura 102). Dichos fenómenos tienen una gran importancia en electricidad, ya que la producción de corriente alterna está basada en ellos. Precisamente, la corriente alterna (figura 103) es aquella cuya intensidad o voltaje cambia periódicamente y mediante una función sinusoidal, con el tiempo (figura 104).

Todas las aplicaciones de la electricidad no habrían sido posibles con la corriente continua (obtenida por generadores de tipo químico). Tampoco la electrotecnia habría alcanzado el papel que actualmente desempeña en el desarrollo industrial.

El principal problema que presenta la corriente continua para todas estas aplicaciones es el de su transporte. Por tanto, debe consumirse cerca del lugar en el que se produce, ya que el traslado a distancias relativamente grandes supone unas pérdidas energéticas cuantiosas debidas al efecto Joule. Además, y también por el mismo efecto, con facilidad se pueden fundir los cables mediante los que se transporta la corriente.

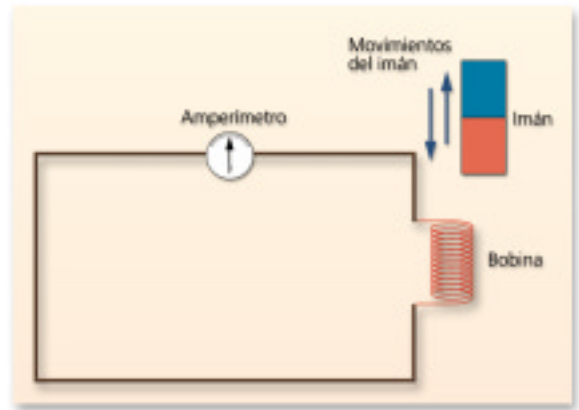


Figura 102

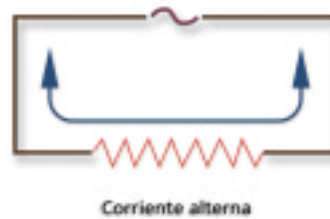


Figura 103

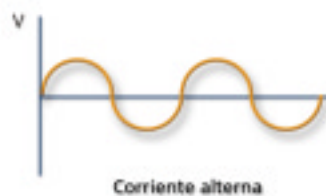
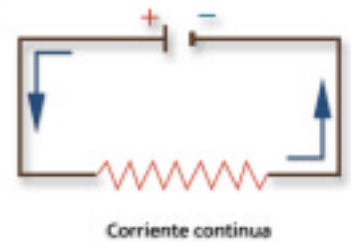


Figura 104





Figura 105

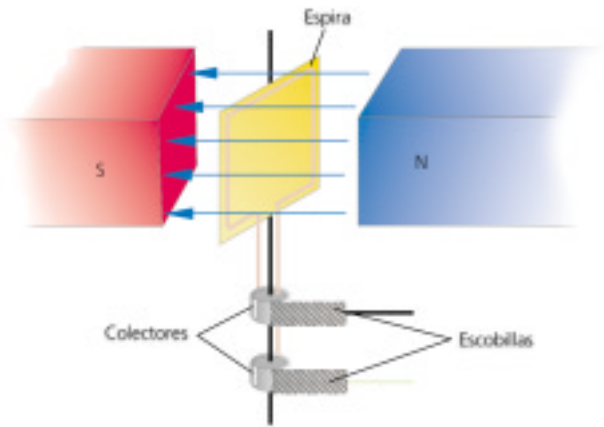


Figura 106

Sin embargo, la corriente alterna es posible transportarla sin las pérdidas energéticas tan importantes. Esto se consigue elevando su potencial mediante el empleo de **transformadores** (figura 105). Al llegar al lugar en el que se ha de utilizar esa corriente, se reduce el potencial, ya que si fuera muy elevado resultaría muy peligroso para el usuario. Se ha de recordar que la potencia de una corriente es el producto de la intensidad por el potencial. Para una misma potencia, a mayor potencial menor intensidad, y como la energía perdida por efecto Joule es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad, a menor intensidad menor pérdida. Pero la elevación del potencial únicamente se puede realizar en corriente alterna, ya que en continua no se pueden utilizar transformadores.

La producción de una corriente alterna se realiza mediante una espira situada dentro de un campo magnético uniforme y que puede girar alrededor de un eje, de manera que la superficie que atraviesa el flujo es variable: si la espira se encuentra perfectamente perpendicular al campo, el flujo que la atraviesa es máximo, mientras que si la espira está paralela al campo el flujo es nulo (figura 106). Una de las formas más sencillas de obtener una corriente alterna es mediante el dispositivo denominado **alternador**. Consiste en un cuadro rectangular que gira alrededor de un eje, tal y como se ha explicado. Los terminales del cuadro están conectados a anillos concéntricos con el eje del cuadro y que giran solidariamente con él. Cada uno de los anillos, aislados entre sí, recibe un terminal. El cuadro giratorio queda conectado al circuito exterior por medio de escobillas deslizantes sobre la periferia de los anillos. El cuadro giratorio está inmerso en un campo magnético uniforme, creado por un imán que recibe el nombre de **inductor**. El cuadro giratorio se denomina comúnmente **inducido**. El flujo del campo magnético a través del cuadro varía al girar éste, de forma que en el cuadro se induce una fuerza electromotriz que origina una corriente que pasa al circuito exterior a través de los anillos y las escobillas. Aplicando la ley de Faraday

de la inducción electromagnética, se puede calcular cuánto vale la fuerza electromotriz inducida en el cuadro móvil. Suponiendo que la espira gire con velocidad angular constante, ω , el ángulo que forma el campo magnético con la superficie es ωt y el flujo viene determinado por el producto escalar del vector campo por el vector superficie (aquel cuya dirección es perpendicular a la superficie y de módulo igual al valor de la superficie), o sea el producto de los módulos de ambos por el coseno del ángulo que forman:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \omega t.$$

Al variar el flujo que atraviesa la espira, se induce en ella una corriente eléctrica, en la que la fuerza electromotriz es la derivada del flujo con respecto al tiempo, cambiada de signo, de modo que la fuerza electromotriz es: $\varepsilon = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t$, función sinusoidal con respecto al tiempo, variable en magnitud y sentido a lo largo del tiempo. Dicha fuerza electromotriz inducida se denomina **alterna**. Si la fuerza electromotriz inducida únicamente atraviesa un circuito que tiene una resistencia óhmica, la intensidad que atraviesa dicha resistencia se calcula mediante la fórmula: $I = I_0 \cdot \sin \omega t$, siendo $I_0 = B \cdot S \cdot \omega / R$. Para aprovechar la fuerza electromotriz alterna producida en una espira es necesario conectarla a un circuito exterior, mediante un mecanismo que recibe el nombre de **alternador elemental**. En la práctica, estos alternadores están formados por asociación de espiras y, además, se suele utilizar más de un campo magnético, formando entre sí determinados ángulos. Puesto que la fuerza electromotriz y la intensidad varían con el tiempo en una corriente alterna, se

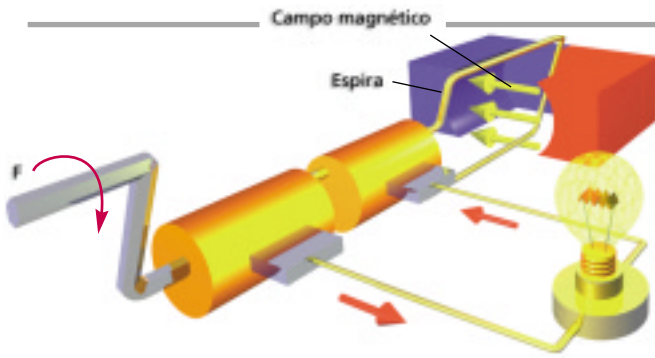


Figura 107

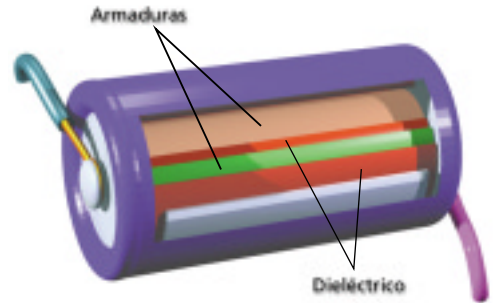
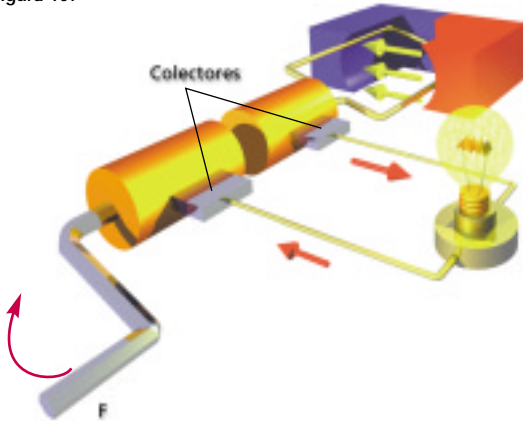
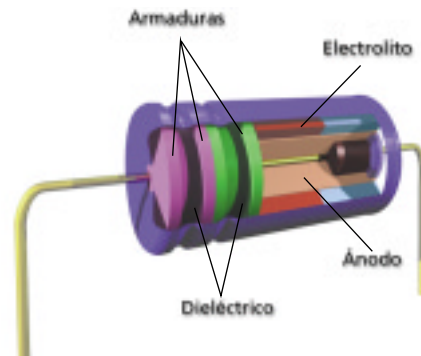


Figura 108



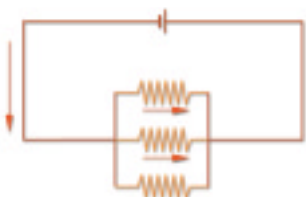
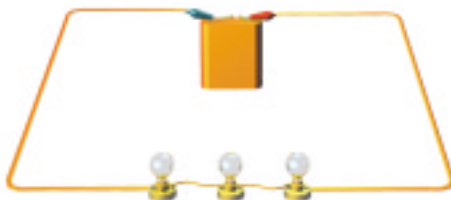
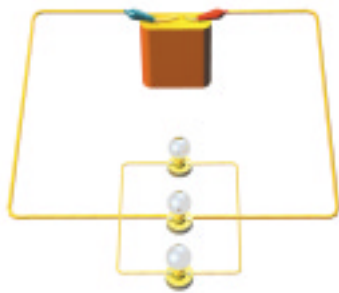
plantea el problema de saber qué valores se han de tomar para calcular el trabajo producido por la corriente. Por ello interesa definir los valores eficaces, tanto para la fuerza electromotriz como para la intensidad.

Se llama **intensidad eficaz** de una corriente alterna la que debería tener una corriente continua que en el mismo tiempo y con las mismas características desarrollara el mismo efecto calórico que la alterna. Se puede demostrar que esta intensidad eficaz es la intensidad máxima dividida por $\sqrt{2}$. Lo mismo sucede con el valor de ϵ_{eficaz} , que será igual a $\epsilon_{\text{máxima}} / \sqrt{2}$. La corriente alterna tiene también otras muchas aplicaciones; algunas de ellas, muy importantes, están en el campo de la medicina. Al conectar a un generador de corriente alterna de gran frecuencia dos electrodos de pequeña superficie previamente fijados en los tejidos a tratar, se produce una corriente eléctrica que circula a través de dichos tejidos. Al incrementar la frecuencia de la corriente utilizada, aumenta el poder de penetración de dicha corriente, llegando ésta hasta tejidos o zonas muy profundos. Este procedimiento puede utilizarse en cirugía. Cuando uno de los electrodos se reduce al tamaño de una aguja, la corriente es tan intensa que el calor generado es capaz de matar las células que circundan al electro-

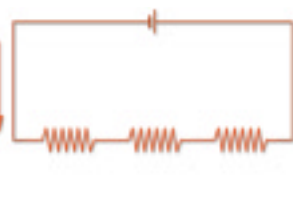
do; se emplea para el tratamiento de tumores. Por otra parte, también es posible registrar los impulsos eléctricos de determinadas zonas del cuerpo humano, pudiéndose detectar así lesiones cardíacas (electrocardiograma), musculares (electromiograma) o cerebrales (electroencefalograma).

CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

Un generador de corriente alterna (figura 107) en el que se unen los dos polos mediante un conductor ya constituye un circuito. De todas maneras se suele utilizar para comunicar esa energía generada a algún elemento externo. Los elementos más comunes en estos circuitos son resistencias óhmicas, autoinducciones y condensadores (figura 108), que pueden estar conectados en paralelo y en serie (figura 109). Únicamente consideraremos el caso en que están colocados en serie y, por tanto, la intensidad que atraviesa cada uno de ellos es la misma. En todos los circuitos que se puedan estudiar se ha de aceptar que la $I = I_0 \cdot \sin \omega t$, mientras que la



Conexión en paralelo



Conexión en serie

Figura 109

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$ siendo φ el ángulo de desfase, es decir, la diferencia que existe, en el tiempo, en alcanzar el valor máximo por parte de ambas. En los circuitos en que únicamente existe una resistencia el ángulo φ vale 0, es decir, la intensidad y la fuerza electromotriz (f.e.m.) están en fase. En los circuitos en que sólo existe una autoinducción, $\varphi = \pi / 2$, es decir, la f.e.m. está adelantada con respecto a la intensidad. La oposición que presenta al paso de la corriente recibe el nombre de **reactancia inductiva** y es función del valor de la autoinducción y de la frecuencia del generador de corriente alterna. En los circuitos que únicamente tienen un condensador de capacidad C , $\varphi = -\pi / 2$, es decir la f.e.m. está retrasada con respecto a la intensidad. La resistencia al paso de la corriente recibe el nombre de **reactancia capacitiva** y es inversamente proporcional a la capacidad y a la frecuencia de la corriente. También se pueden estudiar circuitos con más de un elemento externo. En estos casos el ángulo de desfase no está predeterminado, sino que dependerá de los valores de la resistencia, autoinducción y capacidad. Se puede estudiar mediante su representación en ejes coordenados, teniendo en cuenta los ángulos de desfase «individuales» indicados anteriormente. La resistencia total que estos circuitos ofrecen al paso de la corriente eléctrica alterna recibe el nombre de **impedancia** y se representa con la letra Z .

Por último, cabe indicar que se dice que un circuito está en **resonancia** cuando la resistencia que ofrece al paso de la corriente eléctrica es mínima.

POTENCIA DE UNA CORRIENTE ALTERNA

La potencia de un circuito depende directamente de la tensión aportada por el generador y de la intensidad de la corriente que pasa por el circuito. La

tensión es la fuerza electromotriz inducida que depende del ángulo que forma la espira con el campo y este ángulo depende directamente del tiempo; por ello, la potencia en un circuito en corriente alterna es función del tiempo, y se utiliza el valor medio de la misma a lo largo de un ciclo.

La potencia representa la energía aportada por el generador por unidad de tiempo. Se puede demostrar que en una corriente alterna la potencia media es el producto de la ε eficaz por la intensidad eficaz por el coseno del ángulo de desfase. Si el ángulo de desfase vale 0, la potencia es máxima; mientras que si el ángulo de desfase es $\pi / 2$, la potencia es nula.

AUTOEVALUACIÓN

33. Define el campo eléctrico.
34. ¿Cómo puede anularse el potencial de un conductor?
35. ¿De qué factores depende la potencia de una corriente eléctrica?
36. ¿Qué se conoce como campo magnético?
37. ¿Qué es la declinación magnética?
38. ¿A qué llamamos efecto motor?
39. ¿Qué fenómeno observó Oersted?
40. ¿De qué se compone un electroimán?
41. Cita los dos motivos más importantes por los que se utiliza corriente alterna en lugar de continua.
42. ¿Cómo puede generarse corriente alterna?
43. ¿A qué se llama intensidad eficaz de una corriente alterna? ¿Cómo se calcula?
44. Cita los dos tipos de reactancia y los circuitos que la presentan.
45. ¿Cómo se calcula la potencia de una corriente alterna? ¿Qué pasa cuando el potencial es muy alto?



MOVIMIENTO ONDULATORIO

Entendemos por movimiento ondulatorio la propagación de una perturbación por un medio. Para que se propague un movimiento ondulatorio o vibratorio necesitamos un medio cuyas partículas tengan movimiento.



Figura 110
Las olas del mar forman trenes de ondas que se propagan en una dirección determinada, generalmente hacia la playa.

Supongamos la superficie del agua y lancemos un cuerpo que caiga en un punto a una cierta distancia. Debido a la elasticidad del agua, las partículas se hunden y ascienden, por lo que se realiza un movimiento armónico simple. Como estas partículas de agua están unidas a las que le rodean por las fuerzas de cohesión, transmite el movimiento a todas ellas, y éstas a las siguientes, pero no llegan todas a la vez a

los mínimos, sino que lo hacen en fases sucesivas, dando lugar en conjunto a un movimiento (figura 110). Se observa que, cuando una de las partículas ha realizado una vibración completa, se ha formado una onda. El movimiento ondulatorio (figura 111) se define como el movimiento vibratorio (figura 112) de una partícula propagado en fases sucesivas a todos los puntos del cuerpo dando lugar a una onda.

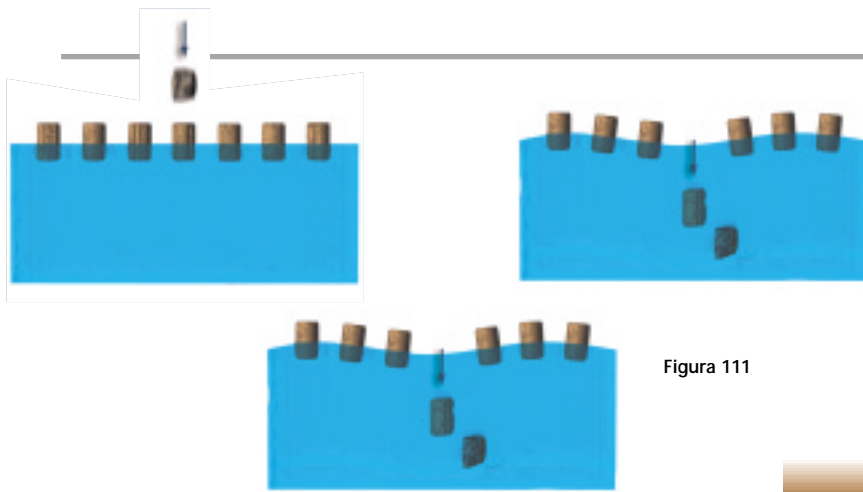


Figura 111

CLASES DE ONDAS

Las ondas pueden clasificarse desde diferentes puntos de vista. Uno de ellos es el que atiende a la dirección relativa de la perturbación y al avance o propagación de esa perturbación. Según esto, las ondas se dividen en transversales y longitudinales. Son **transversales** (figura 113) cuando la perturbación y la propagación de la perturbación son perpendiculares, por ejemplo, un impulso transmitido a una cuerda o las ondas que se propagan en un estanque al tirar una piedra. Si las partículas vibran en la misma dirección que la propagación de la onda, es decir, si la dirección de la perturbación y la de su propagación son paralelas, las ondas se llaman **longitudinales** (figura 114); es el caso de las ondas sonoras.

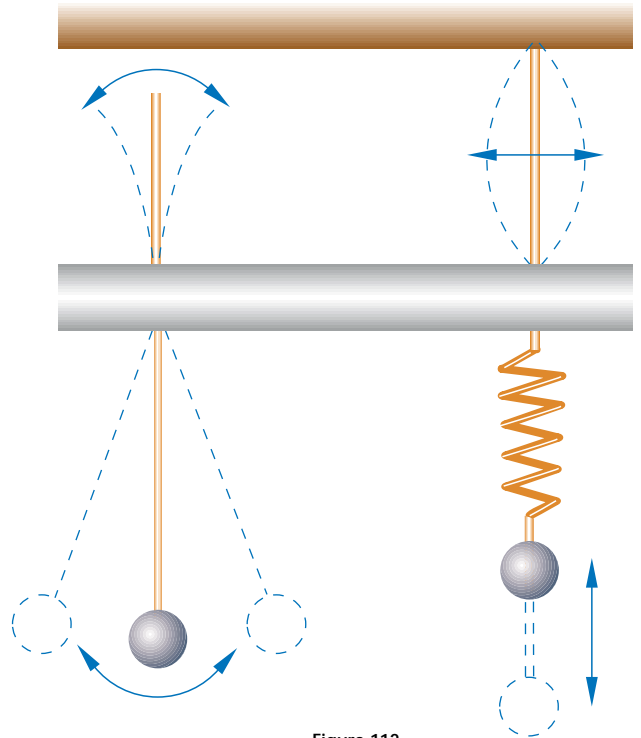


Figura 112

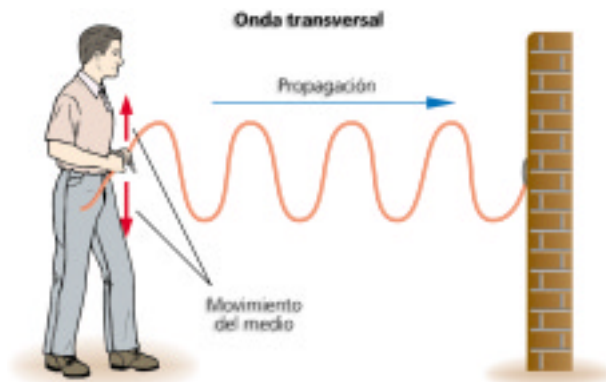


Figura 113

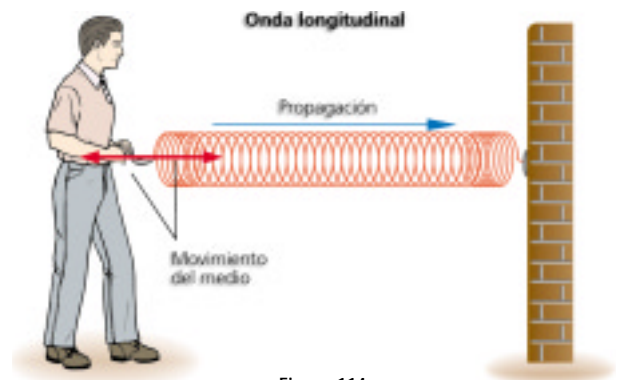


Figura 114



Longitud de una onda transversal

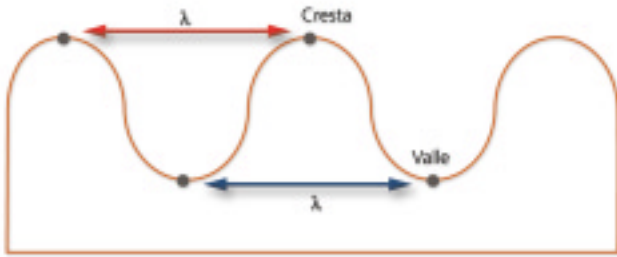


Figura 115

Longitud de una onda longitudinal

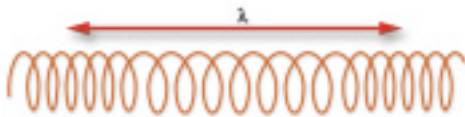


Figura 116

Otra posible clasificación sería entre **ondas mecánicas** y **electromagnéticas**. Las primeras necesitan un soporte material para su propagación, que es innecesario para las electromagnéticas.

Si no existen rozamientos, las ondas tienen la misma altura y se denominan sostenidas, pero en la práctica las ondas van perdiendo altura y se llaman **amortiguadas**.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS

La **longitud** de una onda (figuras 115 y 116) es la distancia entre dos puntos consecutivos que están en la misma fase de vibración; por ejemplo, la distancia que hay de un máximo a un máximo y de un mínimo a un mínimo. Se representa con la letra λ . El **período** es el tiempo que tarda en hacerse una onda y se mide en segundos. Otra importante determinación es la **frecuencia**, que nos da las ondas que se generan en un segundo. Es inversa del período y se mide en vibraciones por segundo o hertz (hercios). En su movimiento de vaivén una partícula del medio que vibra se va acercando y alejando sucesivamente de su situación de equilibrio. La mayor distancia existente al punto de equilibrio recibe el nombre de **amplitud**. La amplitud será la responsable de la intensidad de la perturbación ondulatoria (figura 117).

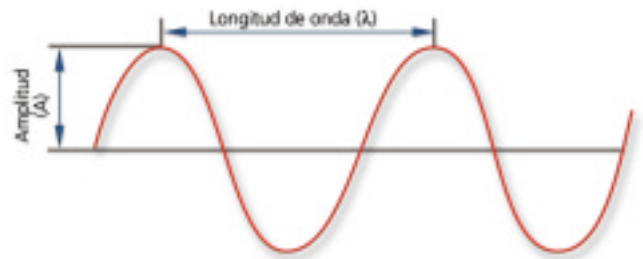


Figura 117

Cuando lanzamos un cuerpo sobre una superficie elástica, ciertos puntos empiezan a vibrar a la vez, y definimos el **frente de onda** como la superficie que contiene todos los puntos que comienzan a vibrar al mismo tiempo. Si el medio es homogéneo, el frente de onda serán circunferencias, que no aparecen si existen medios de distintas densidades.

El **principio de Huygens** nos dice que cualquier punto de un frente de ondas puede considerarse como un nuevo foco de perturbación (del que salen ondas iguales que las del centro original) y que el nuevo frente de ondas es la envolvente de las ondas elementales anteriores.

AUTOEVALUACIÓN

46. ¿Qué diferencia existe entre las ondas mecánicas y las ondas electromagnéticas?
47. ¿Qué clase de onda es el sonido?
¿Se puede propagar en el vacío?
48. ¿Qué diferencia existe entre las ondas longitudinales y las transversales? Pon un ejemplo de cada una de ellas.
49. ¿A qué frecuencia vibra una onda cuyo período (T) es 0,0125 s?
50. En la representación de una onda en función del tiempo, ¿qué significado tiene el tiempo entre dos mínimos consecutivos?





Figura 118

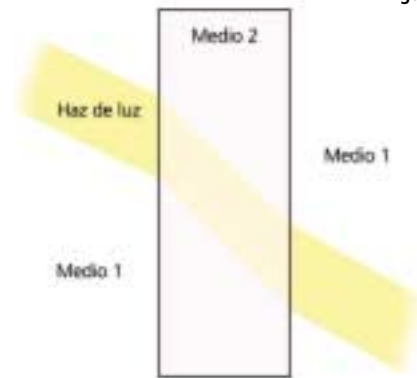


Figura 119

FENÓMENOS ONDULATORIOS

Cuando las ondas llegan a una superficie que separa dos medios de distinta densidad, parte de ellas se refleja. La **reflexión** (figura 118) es el cambio de dirección o de sentido que experimenta la propagación de un movimiento ondulatorio al incidir sobre un obstáculo sin atravesarlo. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano y el ángulo de incidencia tiene que ser igual que el de reflexión.

La **refracción** (figura 119) es el cambio de dirección que experimenta la propagación de un movimiento ondulatorio cuando pasa de un medio material a otro en donde la velocidad de propagación es distinta.

El rayo incidente, la normal y el refractado están en el mismo plano. El rayo refractado sufre una desviación. El ángulo de desviación es el formado por el rayo refractado y la prolongación del incidente.

La **difracción** (figura 120) es un fenómeno que consiste en que las ondas, al encontrar un obstáculo con un orificio, lo atraviesan y se propagan detrás del obstáculo en todas direcciones. Para que se produzca la difracción, el tamaño del orificio ha de ser semejante a la longitud de onda del movimiento ondulatorio. Los ingenieros de puertos han de tener en cuenta esta circunstancia. Si se construyera la boca de un puerto de mar con una anchura que pudiera coincidir aproximadamente con la longitud de onda de la ola, la entrada del puerto se convertiría automáticamente en un emisor de olas de la misma altura que las que llegaban del mar abierto, por lo que el dique del puerto dejaría de cumplir su misión principal que es la de protección de los buques amarrados en él.

LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las diversas formas que presenta la energía radiante o radiación electromagnética se reúnen en el llamado **espectro electromagnético** (figura 121), dividido a su vez en diferentes bandas caracterizadas por sus frecuencias o longitudes de onda.

La energía radiante está constituida por movimientos ondulatorios (campos eléctricos y magnéticos variables), si bien también puede considerársela como haces de partículas o cuantos de energía luminosa llamados **fotones**. Asimismo, la radiación electromagnética puede propagarse sin necesidad de un soporte material, es decir, viajar por el vacío, aunque también puede penetrar en medios transparentes a ella, como la luz visible, que atraviesa el aire, el agua, el vidrio, etc.

La **velocidad** de propagación de las perturbaciones electromagnéticas en el vacío es una constante universal que recibe el nombre de velocidad de la luz (c). La propagación de las ondas electromagnéticas en los medios naturales es más lenta y depende de la propia longitud de onda de la radiación, así como de la densidad del medio. Los valores de la velocidad de propagación de la luz en el vacío y en el aire son casi idénticos, y se consideran igual a $3 \cdot 10^8$ m/s. La energía radiante puede detectarse únicamente cuando provoca algún efecto observable, ya sea físico o químico, por ejemplo, los rayos X o la luz visible, que impresionan las placas fotográficas. Las longitudes de onda de una radiación electromagnética (figura 122) pueden ser de kilómetros en las ondas de radio o de 10^{-9} m en los rayos X o incluso inferiores en la radiación gamma, pasando por los metros de la

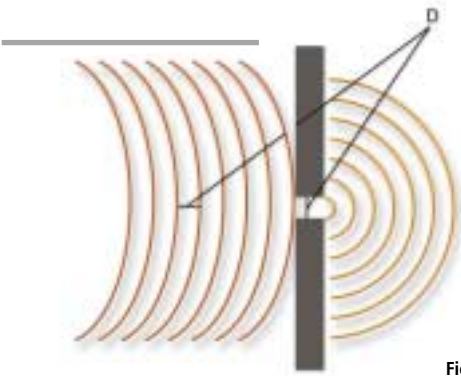


Figura 120

onda de la televisión y los milímetros en los infrarrojos de una estufa, una bombilla o una plancha. Las ondas electromagnéticas aparecen siempre que los electrones oscilan, experimentan una desaceleración (frenado) o pasan de un nivel energético a otro en un átomo. La radiación electromagnética está formada por un movimiento ondulatorio en un campo eléctrico y otro magnético, perpendiculares entre sí y que oscilan con la misma frecuencia. Dichas ondas son transversales, dado que los campos mencionados oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación.

Sin embargo, la radiación electromagnética presenta dualidad corpúsculo-onda, por lo que muestra también propiedades asociadas a las partículas. Las ondas electromagnéticas parten en todas direcciones desde su fuente, que en caso de ser puntual da lugar a frentes de onda esféricos. El aumento de la distancia a la fuente hace que la intensidad de la radiación disminuya con el aumento del área de la superficie del frente de onda esférico, siendo así que dicha intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que la separa de la fuente.

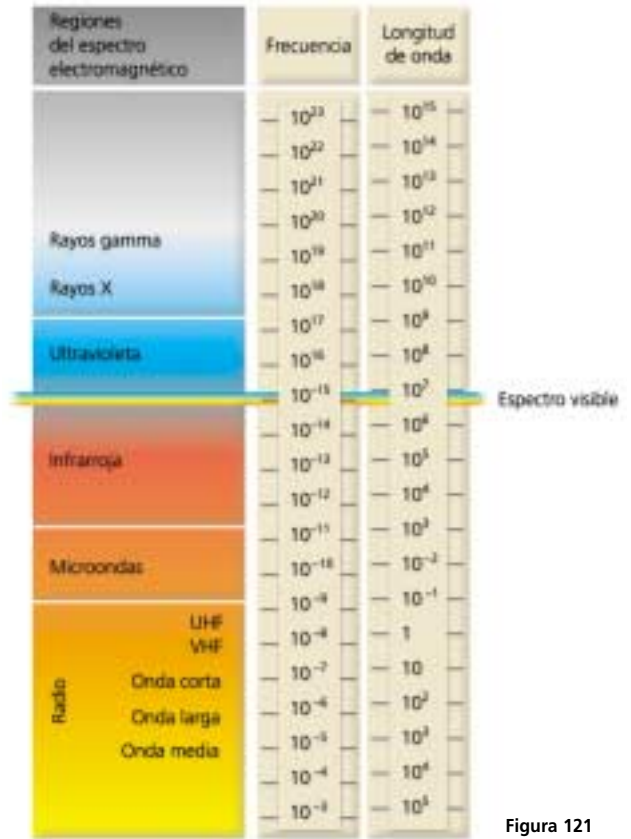


Figura 121

Otra de las características de la radiación electromagnética considerada como onda es su fase. Las fuentes de energía radiante emiten sus ondas al azar, por lo que las vibraciones están desfasadas, es decir, para una onda no coinciden los máximos y mínimos de los campos magnéticos y eléctricos con los de las de-

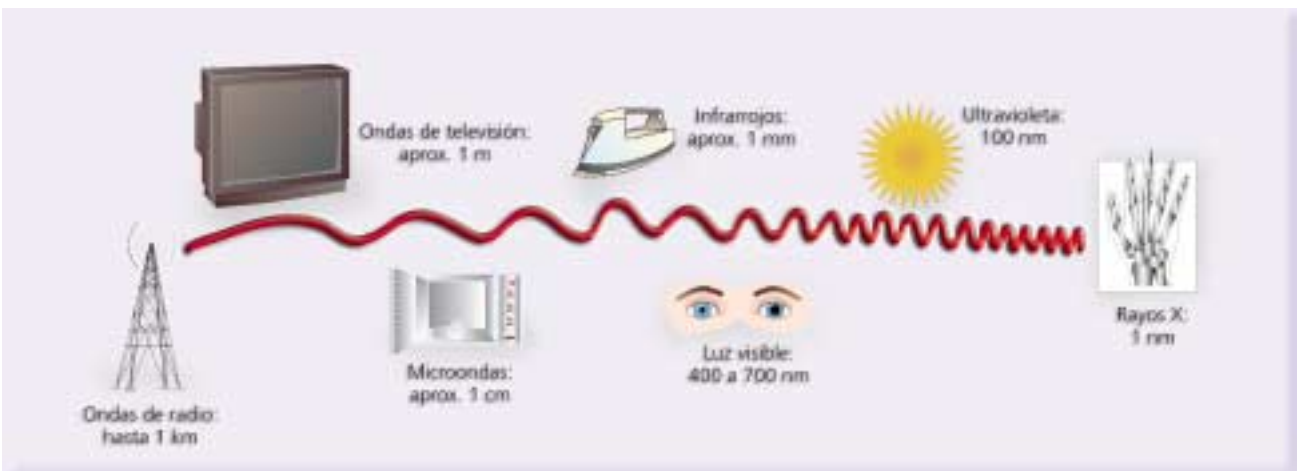
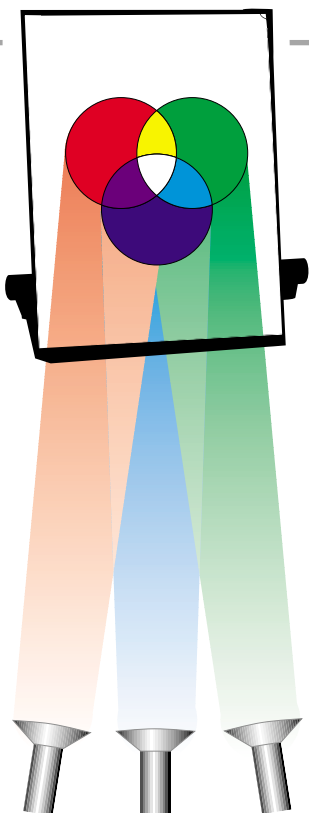


Figura 122

Figura 123



más. Asimismo, al no estar en el mismo plano, las ondas no están polarizadas.

Por otro lado, la propagación a través de un medio puede ir acompañada de dispersión o de refracción, o de ambos efectos a la vez. Asimismo, la radiación electromagnética puede ser reflejada o absorbida por un determinado medio, dependiendo del tipo de energía radiante o del material en cuestión. Cuando la radiación electromagnética es absorbida, interactúa con las moléculas o átomos que forman la sustancia aumentando su energía, que puede llegar a convertirse en calor. La radiación electromagnética sufre fenómenos de difracción e interferencia.

Finalmente, es posible polarizar las ondas electromagnéticas con el fin de que todos los campos eléctricos vibren en un mismo plano y, como consecuencia, lo hagan también los magnéticos.

LA LUZ VISIBLE

La luz blanca está compuesta en realidad por una serie de colores (figura 123), cada uno de los cuales se caracteriza por una longitud de onda determinada. Estos colores son: el rojo, el naranja, el amarillo, el verde, el azul, el añil y el violeta. De ellos, el rojo es el que tiene la longitud de onda mayor y el violeta, la menor. Sin embargo, todos estos colores no están nítidamente divididos entre sí, sino que forman un espectro continuo (figura 124).

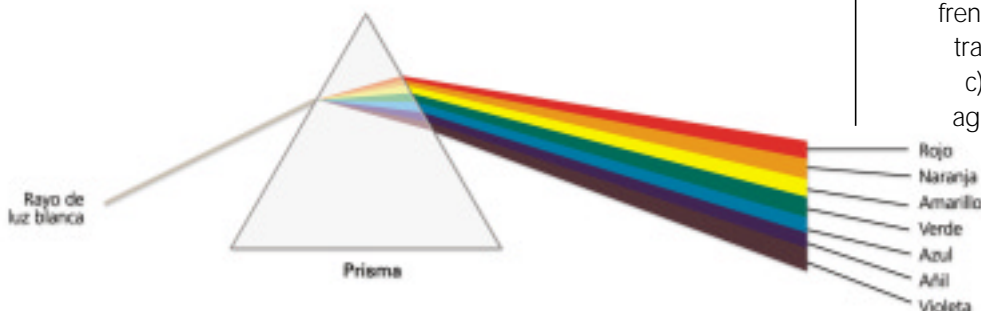


Figura 124

Uno de los efectos que presenta la luz blanca es el de la dispersión de los colores que la componen cuando incide con un ángulo determinado desde un medio a otro cuya densidad es diferente a la del primero. Como consecuencia de la diferencia de longitudes de onda, la luz de los diversos colores se propaga con velocidades distintas y ángulos de difracción diferentes, lo que da lugar a la separación de la luz blanca en el espectro continuo.

Este efecto puede observarse en el arco iris, en el que la luz solar es refractada y dispersada por las gotas de lluvia. Por otro lado, el color azul del cielo se debe a la dispersión de la luz solar, que se difracta en las moléculas de la atmósfera.

AUTOEVALUACIÓN

51. El televisor es un emisor de ondas electromagnéticas. Si dos personas A y B se encuentran a 2 y 4 m, respectivamente, del televisor: a) A recibe el doble de radiación que B; b) A recibe cuatro veces más radiación que B; c) la radiación recibida por A y por B son iguales, ya que ésta no depende de la distancia.
52. El año luz es una unidad de longitud equivalente a la distancia que recorrería la luz en un año. ¿A qué distancia en metros corresponde?
53. Si una onda llega a un obstáculo plano y opaco para este tipo de onda, y la podemos detectar al otro lado del obstáculo podemos afirmar: a) Que las ondas atraviesan los obstáculos que le son opacos; b) que al sufrir el choque con el frente de onda los obstáculos se transforman en transparentes; c) que el obstáculo tenía un agujero de diámetro parecido a la longitud de la onda y ésta se ha difractado.



ÓPTICA

La óptica es la rama de la física que centra su actividad en el estudio del rango del espectro electromagnético que abarca las longitudes de onda visibles para el ser humano (figura 125). Dicha radiación presenta todas las características de las ondas electromagnéticas, es decir, reflexión, refracción, difracción, interferencia y polarización, además de la dualidad corpúsculo-onda.

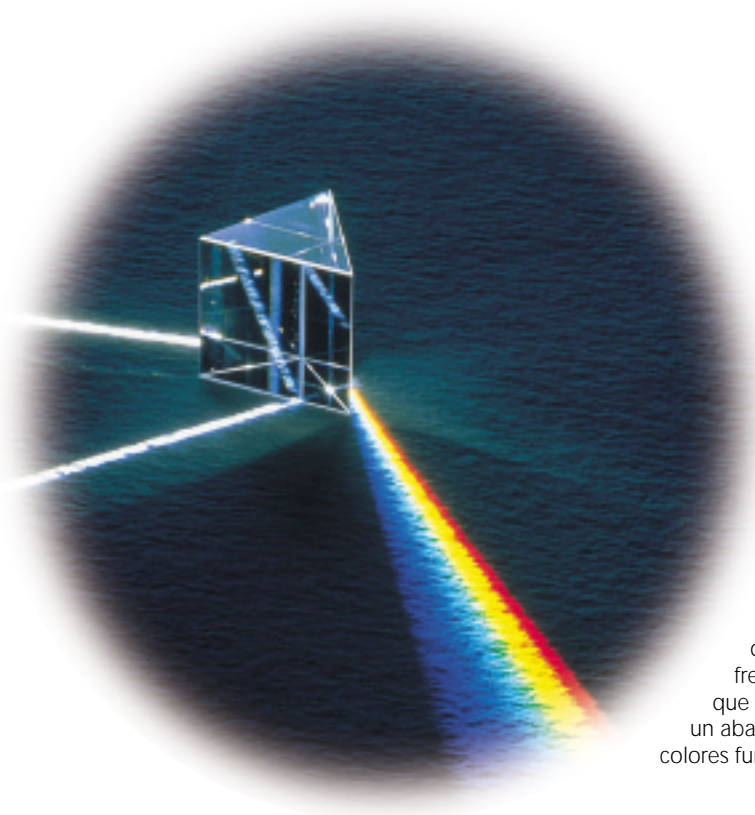


Figura 125
Si la luz blanca incide oblicuamente sobre una cara de un prisma óptico se descompone según las frecuencias de las ondas que la componen produciendo un abanico cromático con los siete colores fundamentales.

PROPAGACIÓN DE LA LUZ

La propagación de la perturbación electromagnética se produce en forma de frentes de onda luminosos formados por los rayos que parten de la fuente y se propagan en línea recta (figura 126). Cuando dichos rayos topan con un obstáculo que no permite su paso (pantalla) (figura 127), se produce detrás de él una región que recibe el nombre de **sombra**. El tamaño de dicha región depende tanto de la distancia entre la

fuente luminosa y el objeto como de los tamaños relativos de ambos. Así, las fuentes luminosas puntuales dan sombras de límites bien definidos y en las que la oscuridad es uniforme, mientras que cuando la fuente es relativamente grande la zona de sombra está rodeada por una de **penumbra**, en la que la oscuridad no es tan pronunciada. Esto es lo que sucede, en el caso de los eclipses, en los que existe una zona de totalidad (correspondiente al cono de sombra) y una zona de parcialidad (correspondiente a la penumbra) (figuras 128 y 129).

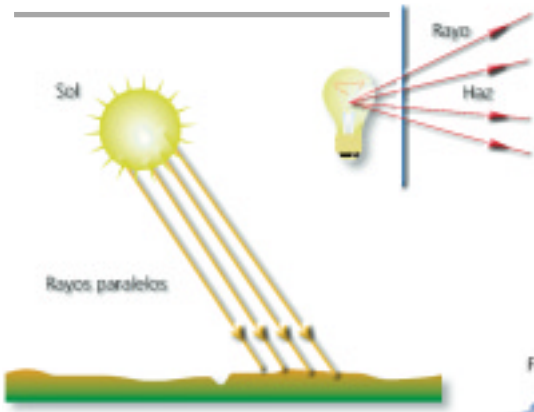


Figura 126

REFLEXIÓN DE LA LUZ

Los fenómenos de reflexión que afectan a la luz visible son innumerables y nos permiten en realidad ver los objetos de nuestro entorno, ya que la visión está en función de la luz que los objetos que carecen de ella son capaces de reflejar. Existen, por otro lado, superficies que reflejan únicamente algunas longitudes de onda del espectro visible, por lo que aparecen a nuestra vista con un color determinado (el reflejado) y absorben los demás. Asimismo, hay cuerpos completamente mates capaces de absorber la totalidad de las longitudes de onda contenidas en la luz blanca. El tipo de superficie que refleja la luz tiene una importancia especial a la hora de que se formen o no imágenes. Así, por ejemplo, las superficies rugosas o

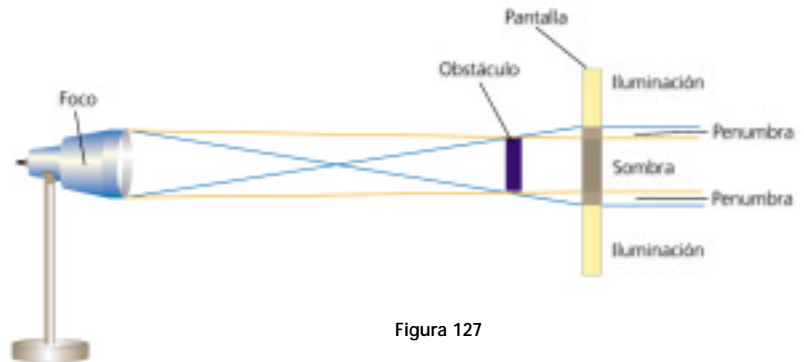


Figura 127

mates reflejan la luz de un modo difuso y desordenado (figura 130), por lo que no las forman, mientras que las lisas y pulidas (los espejos) la reflejan uniformemente, siendo por ello capaces de formar imágenes nítidas (figura 131).

Los **espejos** pueden clasificarse en tres tipos: los planos (que son los más usuales), los cóncavos (como los que se emplean en ciertos telescopios) y los convexos (que se emplean para la fabricación de retrovisores del tipo llamado panorámico). Para el estudio de la formación de las imágenes se emplean espejos cóncavos y convexos esféricos (figura 132). Los espejos esféricos muestran algunos elementos característicos, tales como el polo, que es el punto central del espejo. Asimismo, presentan el llamado eje principal, que es una línea imaginaria que pasa tanto por su foco como por su polo. Otro de sus puntos característicos es el centro de curvatura, es decir, el centro de la esfera que incluye la superficie del espejo. Foco

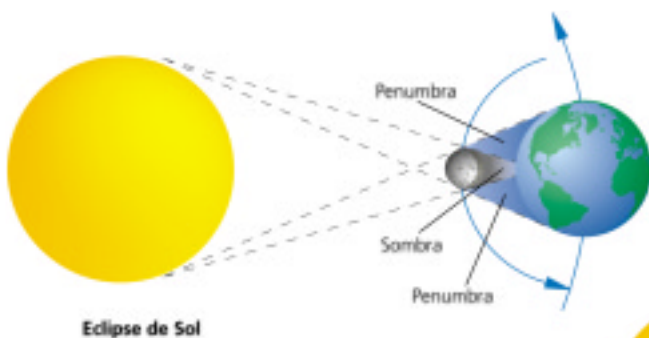


Figura 128

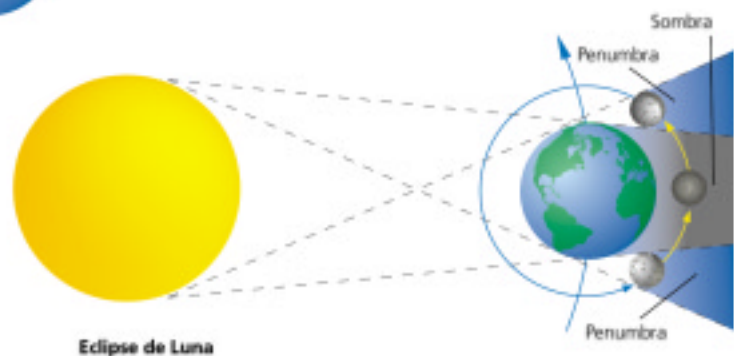
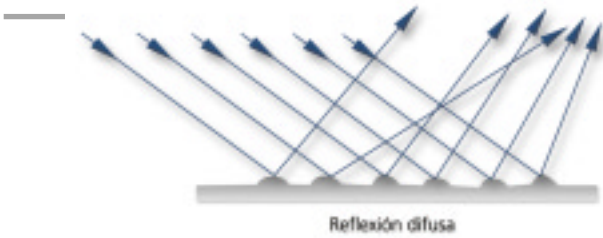
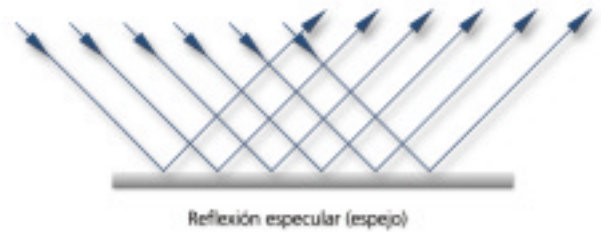


Figura 129



Reflexión difusa
Figura 130



Reflexión especular (espejo)
Figura 131

principal es el punto donde convergen los rayos reflejados que provienen de rayos incidentes paralelos al eje principal, en el espejo cóncavo; en el convexo, como la luz diverge, el foco se forma en la prolongación de los rayos reflejados: es virtual.

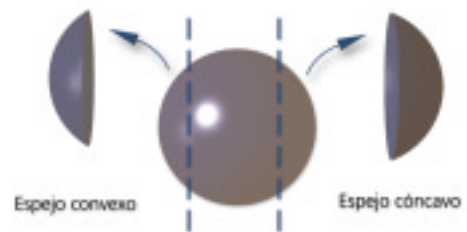
La reflexión se basa en dos leyes fundamentales; la primera afirma que tanto el rayo incidente como el reflejado están contenidos en el mismo plano que la normal (perpendicular a la superficie reflectante en el punto de incidencia). La segunda afirma que el ángulo formado por el rayo incidente y la normal (ángulo de incidencia) es igual al que forman dicha normal y el rayo reflejado (ángulo de salida o de reflexión). Dichas leyes permiten establecer la imagen que se obtendrá con cada uno de los tipos de espejo mencionados.

En el caso de los **espejos planos**, la imagen que se forma tiene el mismo tamaño que el objeto, y ambas equidistan del plano del espejo, sin embargo, presenta inversión lateral (simetría especular). La representación geométrica de imágenes mediante espejos planos se observa en la figura 133. Si el objeto es un punto A, los rayos luminosos procedentes de un foco luminoso inciden sobre el espejo y se reflejan cumpliendo las leyes de la reflexión (ángulo incidente = ángulo reflejado). De todos ellos sólo se han representado los que van al ojo de un observador. La

imagen se obtiene prolongando los rayos reflejados por detrás del espejo. Las prolongaciones de los rayos reflejados se cortan en el punto A'. El ojo del observador cree que el objeto está en el punto A', al otro lado del espejo. Las imágenes que se forman prolongando los rayos reflejados se denominan imágenes virtuales. Éstas no pueden ser recogidas en una pantalla, ya que los rayos no atraviesan el espejo; son una ilusión óptica.

Si el objeto tiene cierta longitud hay que buscar la imagen de cada uno de sus puntos, pero es suficiente con los puntos extremos A y B (figura 134).

En los **espejos cóncavos** el tipo de imagen que se forma depende de la distancia que separa el objeto del espejo. Cuando el espejo está a una distancia ma-



Espejo convexo
Espejo cóncavo
Figura 132

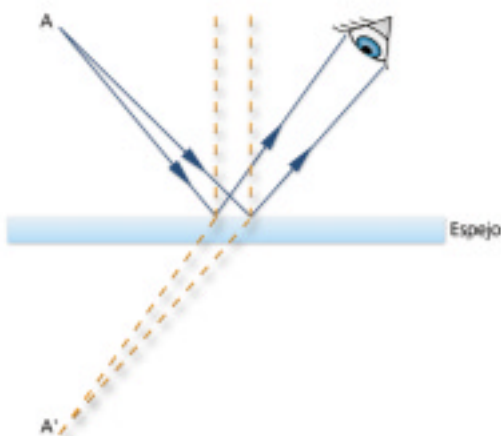


Figura 133

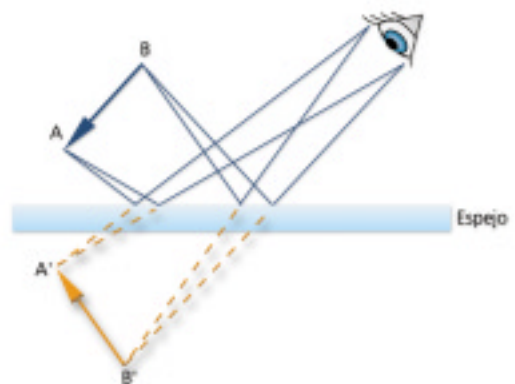


Figura 134

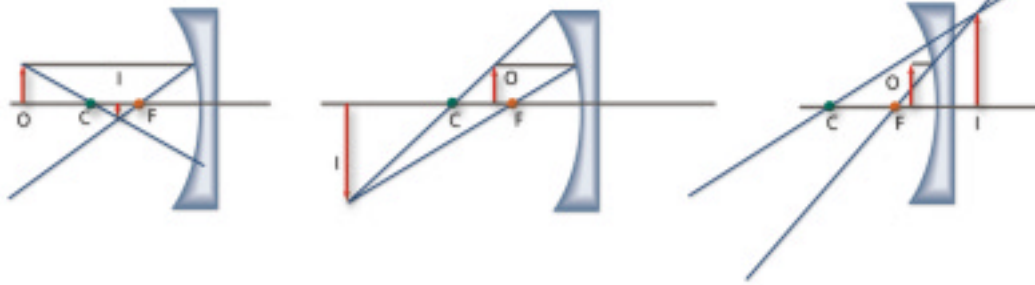


Figura 135

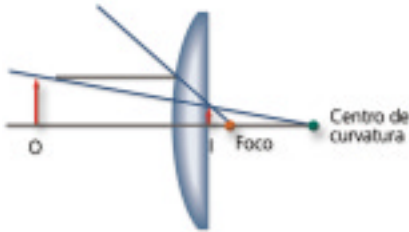
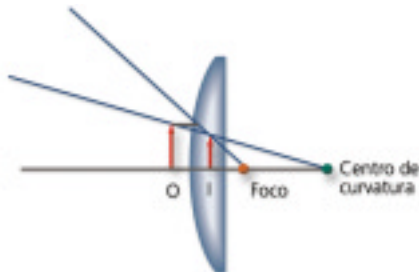


Figura 136



yor a la del foco del espejo, la imagen que se forma es invertida y real, mientras que si se encuentra situado entre el foco y el espejo, es directa, virtual y más grande que el objeto (figura 135).

Los **espejos convexos** dan lugar siempre a imágenes directas, virtuales y más pequeñas que el objeto, dependiendo su tamaño de la distancia que separe el objeto del espejo (figura 136).

REFRACCIÓN DE LA LUZ

Es una desviación que experimentan los rayos luminosos al paso de un medio transparente de densidad determinada a otro cuya densidad es distinta de la anterior. Si bien este fenómeno se presenta generalmente al paso de un medio a otro, existe un caso en el que dicho paso no implica refracción, que es cuando la incidencia se produce perpendicularmente a la superficie de separación de ambos medios (figuras 137, 138 y 139). La refracción es fundamental para la explicación de los procesos que experimen-

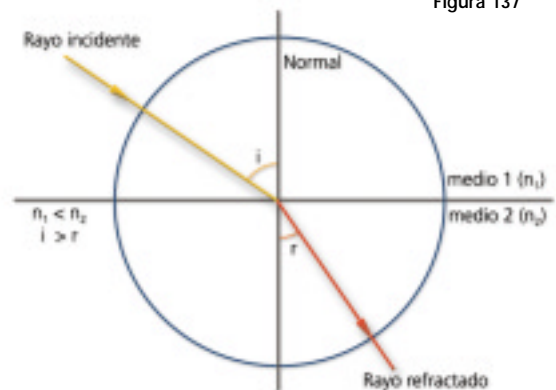


Figura 137

ta la luz en prismas y lentes de todo tipo. Mientras que la luz se propaga con velocidades diferentes dependiendo de la densidad del medio por el que lo hace (cuanto mayor es la densidad de éste tanto más lenta es la propagación de la luz), la intensidad del fenómeno de la refracción depende del grado de la variación de la velocidad de propagación (cuanto mayor es éste, tanto mayor es la refracción que experimenta el rayo, y en consecuencia tanto mayor es el poder de refracción del medio). El **índice de refracción absoluto** es el resultado de relacionar la velocidad de la luz en el vacío con la velocidad a la que ésta se propaga en el seno del medio en cuestión. Sin embargo, el valor del índice depende del color de la luz, por lo que generalmente se indica para la luz amarilla. Dicho índice tiene un valor de 1,3 para el agua. Dado que en los casos habituales la luz pasa de un medio con un índice de refracción determinado a otro cuyo índice es diferente, se define el concepto de **índice de refracción relativo**, que relaciona los índices de refracción de ambos medios y que es equivalente a dividir la velocidad de propagación de la luz en un medio por la del otro, o al cociente de los índices de refracción absolutos de ambos medios. Dado que el aire

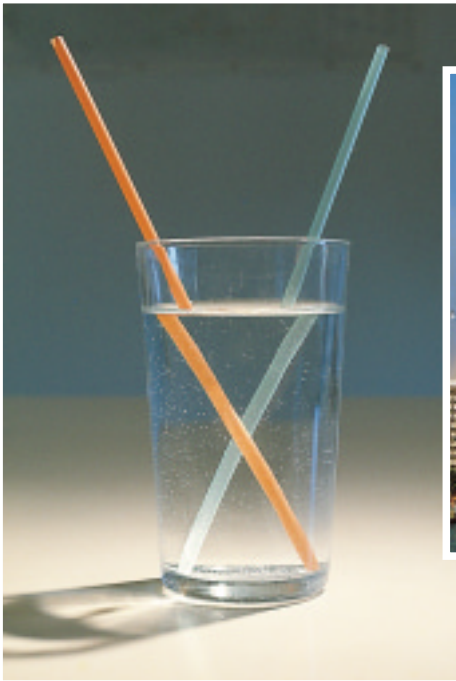


Figura 138



Figura 139

tiene casi el mismo índice de refracción absoluto que el vacío, por regla general se considera que el índice de refracción absoluto de una cierta sustancia es el índice de refracción de ésta con respecto al aire. El fenómeno de la refracción se rige de acuerdo con dos leyes; la primera afirma que tanto el rayo incidente como el refractado y la normal a la superficie de refracción están contenidos en un mismo plano. La segunda ley, llamada también **ley de Snell**, afirma que para una luz con una frecuencia determinada, el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante e igual al índice relativo de ambos medios. Esta ley constituye el fundamento del funcionamiento de los **refractómetros**, empleados para la determinación de los índices de refracción de los diversos materiales a partir de la medición precisa de los ángulos de incidencia y refracción.

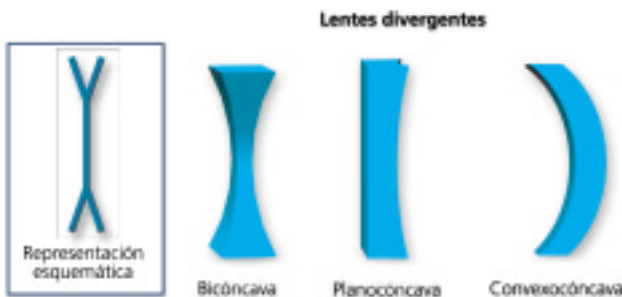


Figura 140

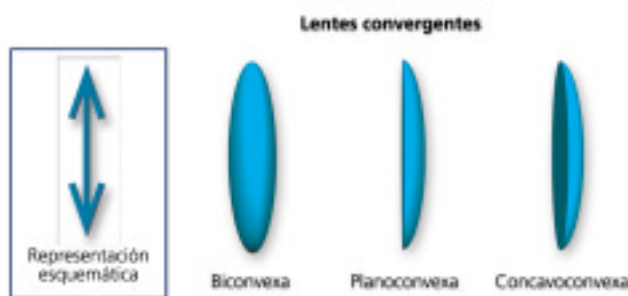


Figura 141

LENTEs

La aplicación más importante de los fenómenos de refracción en los medios es la obtención de imágenes gracias al empleo de **lentes**. Existen dos tipos principales de lentes: las cóncavas o divergentes (figura 140) y las convexas o convergentes (figura 141). Las **lentes cóncavas** son aquellas cuyo espesor es menor en su centro que en sus bordes. Se dividen en tres tipos principales, que son: las bicóncavas, en las que, como su nombre indica, ambas superficies son cóncavas; las planoconvexas, en las que mientras que una superficie es cóncava la otra es plana, y las convexocóncavas, en las

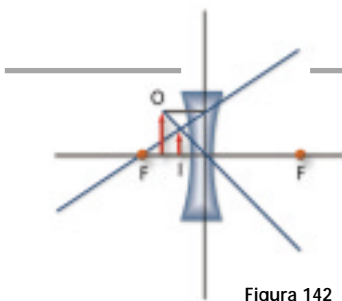


Figura 142

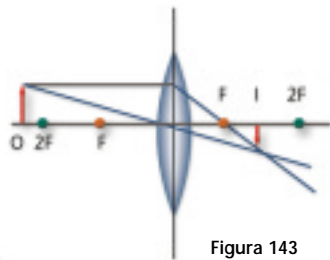


Figura 143

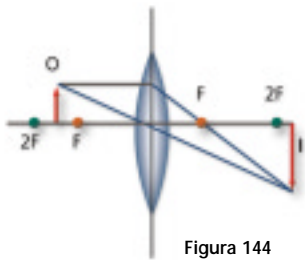


Figura 144

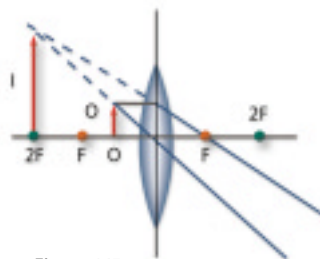


Figura 145

que una de las superficies es ligeramente convexa, mientras que la otra es cóncava.

Al igual que lo que sucede con las convexas, en las lentes cóncavas su forma desvía a la luz del mismo modo, si bien las lentes cóncavas refractan los rayos de luz de un modo divergente, motivo por el cual las imágenes a que dan lugar son virtuales, además de menores y derechas (figura 142). Por su parte, las **lentes convexas** son aquellas cuyo espesor central es mayor que el de sus bordes. Al igual que en el caso de las cóncavas, existen tres tipos principales de lentes convexas: las biconvexas, con sus dos superficies convexas; las planoconvexas, en las que mientras una es convexa la otra es plana, y las concavoconvexas, en las que una de sus superficies es ligeramente cóncava, mientras que la otra es convexa. Las imágenes formadas por las lentes convexas dependen, al igual que las formadas por los espejos, de la situación del objeto con respecto a la lente, el foco o a la distancia doble focal ($2F$). Si el objeto es lejano (su distancia a la lente es superior a $2F$) (figura 143), su imagen se

formará detrás de la lente y cerca de ella, real, invertida y de menor tamaño. Si se sitúa entre F y $2F$ (figura 144), la imagen se formará también detrás de la lente pero más lejos, grande, invertida y real.

Al igual que en los espejos, un objeto situado en el foco no genera ninguna imagen. Si el objeto se sitúa muy cerca de la lente, entre ella y el foco (figura 145), la imagen será virtual, en el mismo lado de la lente que el objeto, grande y derecha. Cuando se utiliza una lupa, el objeto que queremos observar lo situamos en esta última posición.

AUTOEVALUACIÓN

54. Sabiendo que el índice de refracción absoluto del agua es 1,3 y que la velocidad de la luz en el vacío es de 300.000 km/s, ¿cuál será la velocidad de la luz amarilla dentro del agua?
55. El índice de refracción absoluto del diamante es 2,4. Teniendo en cuenta el ejercicio anterior, ¿por dónde circula más rápida la luz?: a) Por el agua; b) por el diamante; c) la velocidad de la luz es indiferente del medio por el que se desplaza.
56. ¿Por qué algunas ambulancias llevan la palabra AMBULANCIA escrita con todas las letras al revés y de derecha a izquierda?
57. Para mirar un grano de la cara podemos utilizar un espejo cóncavo. Colocaremos nuestra cara entre el y el
58. ¿Con qué sistema sencillo y rápido se puede determinar el foco de una lente convergente?
59. Si un rayo luminoso incide en una superficie que separa el agua del aire. ¿A partir de qué ángulo de incidencia habrá sólo reflexión? El índice de refracción del agua es 1,33 y el del aire 1.
60. El cristalino del ojo es una lente convergente y la retina es la pantalla que recoge la imagen. ¿Qué tipo de lente necesita una persona miope si la imagen se le forma antes de llegar a la retina?



ACÚSTICA

La acústica es la rama de la física que se encarga del estudio de los sonidos (figura 146), si bien en la actualidad dicha expresión se refiere más bien a las técnicas utilizadas para el tratamiento de los sonidos en recintos y lugares cerrados.



Figura 146
El sonido se transmite mal a través de la fibra óptica, pero ésta es una conductora perfecta de la luz, que transformada en impulsos eléctricos hará vibrar una membrana que detectaremos como sonido.

EL SONIDO

Está formado por una serie de ondas de compresión y enrarecimiento que transmiten energía cinética por el interior de medios materiales (figura 147). El timbre de la figura 148, en el supuesto que el vacío alcanzado en el interior de la campana fuera absoluto y la campana estuviera protegida de las vibraciones mecánicas, no sonaría. Como el vacío no llega nunca a ser total y el timbre comunica su vibración al soporte de la campana de vacío se oiría un repi-

queteo muy amortiguado. Los sonidos se generan todos en elementos que se encuentran en vibración, la cual se transmite al medio y a través de él llega hasta el tímpano. En el oído son transformados en impulsos que se transmiten hasta el cerebro, donde son interpretados. Las ondas se clasifican en dos tipos principales: las **longitudinales** (que vibran en la dirección de la propagación) y las **transversales** (que lo hacen perpendicularmente a dicha dirección). Las ondas sonoras son del primer tipo y consisten en una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos.

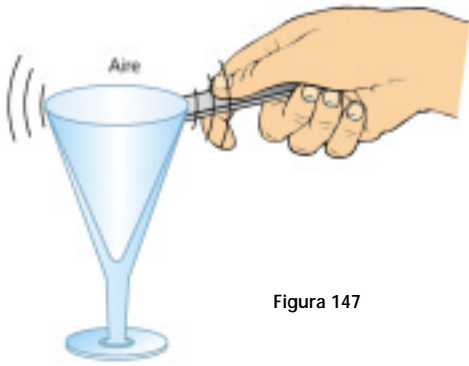


Figura 147



Figura 149

pendiendo de la densidad y elasticidad de éstos. Así, mientras que el sonido se propaga en el aire seco (a una temperatura de 20 °C) a una velocidad de unos

335 m/s, en los sólidos dicha velocidad es aproximadamente unas cuatro veces mayor. El sonido supera con dificultad los cambios de densidad entre medios distintos, por lo que para el aislamiento sonoro es más aconsejable la interposición de un elemento que obligue al paso de éste por medios de densidades muy distintas, que la de elementos muy espesos. La temperatura influye también sobre la velocidad de propagación del sonido, ya que su aumento provoca una dilatación del medio que disminuye su densidad, por lo que la velocidad se reduce. Se dice que un objeto ha pasado la barrera del sonido cuando ha superado la velocidad de éste en el aire: unos 340 m/s (figura 150).

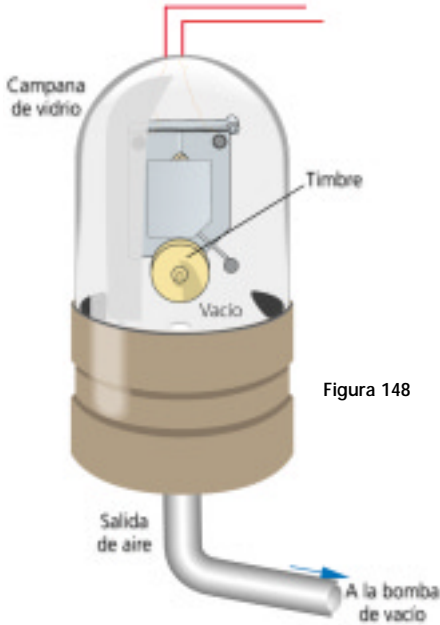


Figura 148

Para poner esto de manifiesto podemos considerar el caso de un diapasón que vibra. Cada una de las vibraciones de sus varillas produce hacia fuera una compresión, para acto seguido dar lugar a un enrarecimiento al batir hacia dentro, seguido de nuevo por otra compresión, etc. De este modo se dice que un ciclo está compuesto en esta oscilación por una compresión y un enrarecimiento, y la longitud de onda de dicha perturbación es la distancia que separa dos compresiones o dos enrarecimientos sucesivos (figura 149).

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN

La **velocidad** a la que se propaga el sonido es siempre la misma para un cierto medio y una temperatura dados, ya sea éste sólido, líquido o gas. Sin embargo, existen diferencias entre las velocidades de propagación del sonido para diversos medios, de-

CUALIDADES DEL SONIDO

La variedad de sonidos que el oído humano puede percibir se debe a diferencias en la amplitud y en la frecuencia de las ondas sonoras, vinculadas a la intensidad, tono y timbre (figura 151).

La **frecuencia** de las ondas sonoras se define como el número de oscilaciones que se producen en un segundo, y se mide con la unidad llamada hercio (Hz), que equivale a un ciclo por segundo. El oído humano sólo percibe los sonidos comprendidos entre 20 y 20.000 Hz.

La **intensidad** es la cualidad que permite identificar los sonidos como fuertes o débiles. Un sonido será fuerte si su intensidad es elevada y débil si su intensidad es baja. La unidad con que se expresa la sonoridad es el decibelio (dB). Por encima de los 140 dB de amplitud, la onda sonora puede causar daños irreversibles en el oído humano (figura 152).

El **tono** es la propiedad que permite distinguir los sonidos graves de los agudos y depende de la frecuencia de la onda sonora. Los sonidos graves correspon-

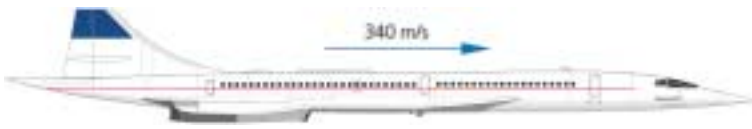


Figura 150

den a ondas de menor frecuencia y los agudos de mayor frecuencia. Así, las voces de los niños son agudas, mientras que las de los adultos suelen ser graves. El **timbre** es la cualidad que permite distinguir la procedencia de dos sonidos del mismo tono y la misma intensidad: por ejemplo, distinguimos si el sonido de una determinada nota musical proviene de un piano o un violín.

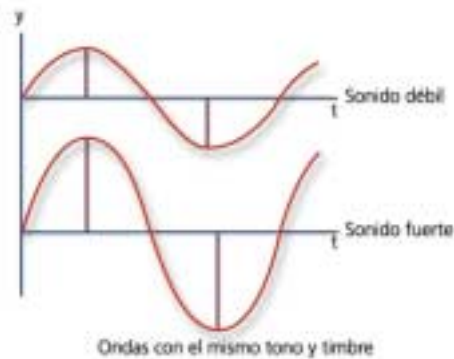


Figura 151

PERCEPCIÓN DEL SONIDO

La **percepción del sonido** por el oído humano se verifica en la gama de frecuencias que abarca desde los 20 hasta los 20.000 Hz. La capacidad del oído humano para percibir las frecuencias altas va disminuyendo con la edad. Además, dicha percepción de los sonidos, que depende de la distancia, se ve afectada por algunas circunstancias, tales como la interposición de un obstáculo entre la fuente sonora y el receptor o el movimiento relativo entre ésta y aquél. En el primer caso se producen efectos de difracción, reflexión y refracción que condicionan la recepción. En el segundo se produce un efecto que varía la frecuencia percibida y que recibe el nombre de **efecto Doppler**. Este efecto puede observarse claramente en el caso de que una ambulancia que haga sonar su sirena se acerque hacia nosotros, lo que produce una reducción del intervalo que media entre las sucesivas compresiones y enrarecimientos, motivo por el cual aumenta la frecuencia (el tono de la sirena es más alto). Una vez que la ambulancia nos ha rebasado y se aleja de nosotros, el intervalo aumenta y la frecuencia disminuye (el tono suena más bajo) (figura 153).

EFFECTOS DE LAS ONDAS SONORAS

El carácter ondulatorio del sonido hace que experimente los mismos efectos que otras perturbaciones de este tipo. Si un sonido tiene un origen puntual, los frentes de las ondas (de compresión y enrarecimiento)

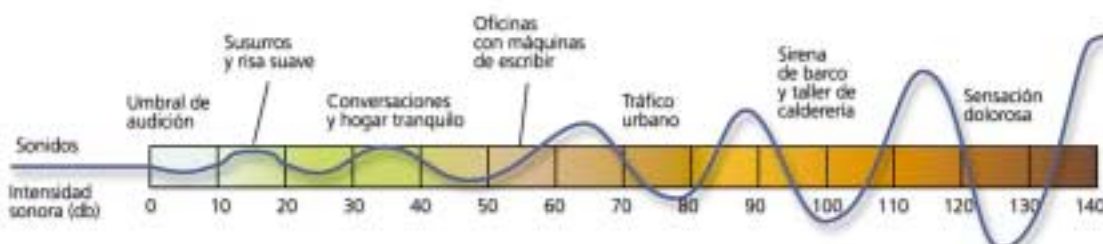


Figura 152

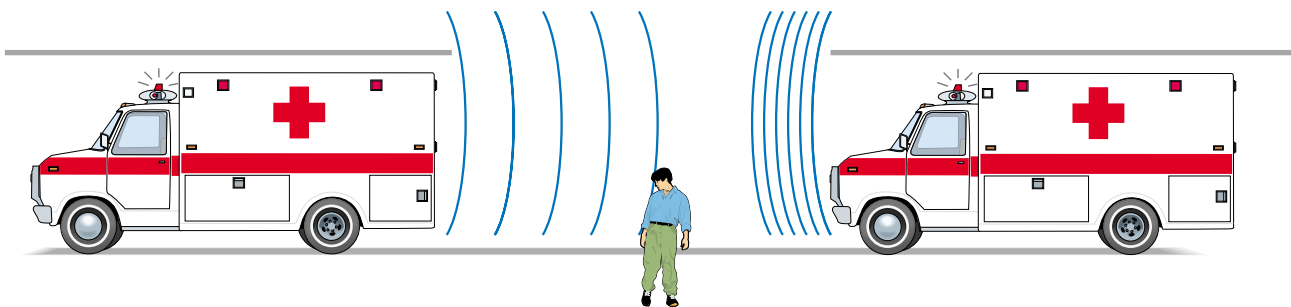


Figura 153

to) serán esferas que se alejarán cada vez más de la fuente, cuyo volumen irá disminuyendo. Entre los fenómenos que experimenta el sonido se encuentran la difracción, la reflexión y la refracción.

DIFRACCIÓN DEL SONIDO

La difracción se produce, por ejemplo, cuando el sonido pasa por un orificio cuyas dimensiones son menores que su longitud de onda, situación en la que se refleja una fracción muy pequeña y el resto continúa su camino modificada.

REFLEXIÓN DEL SONIDO

La reflexión (figura 154) del sonido se produce con gran frecuencia y da lugar a efectos tales como los ecos y las reverberaciones.

El sonido, al igual que los demás movimientos ondulatorios, cumple también la ley de la reflexión, es decir, que el ángulo con el que incide sobre la superficie reflectora es igual al ángulo de reflexión. Las ondas sonoras necesitan, sin embargo, superficies relativamente grandes (de algunos metros cuadrados) para que la reflexión se verifique, mientras que ésta se produce aun cuando la superficie en cuestión sea algo rugosa, lo que es una consecuencia de sus grandes longitudes de onda. Una de las consecuencias de la reflexión del sonido es la formación de ecos, que se perciben cuando el sonido regresa tras al menos $1/20$ s (persistencia del sonido en el oído humano).

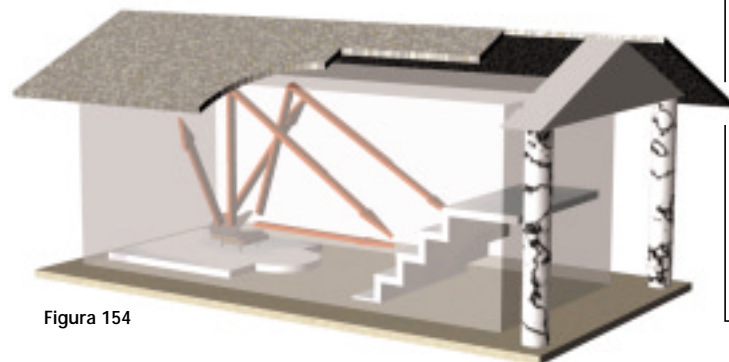


Figura 154

Además, la velocidad del sonido en el aire (de unos 335 m/s) hace que el eco no se escuche a menos que medien entre la superficie reflectora y el oyente una distancia mínima de 10 m. En caso contrario se produce reverberación.

REFRACCIÓN DEL SONIDO

La refracción del sonido se produce cuando éste pasa de un medio a otro cuya densidad es distinta del primero. Así, gran parte del sonido se refleja en la superficie de separación de ambos medios, siendo muy pequeña la fracción de sonido refractada.

AUTOEVALUACIÓN

61. Si consideramos que la luz llega de forma instantánea a distancias relativamente cortas y que el sonido se desplaza a 340 m/s, ¿cuál será el error cometido por un juez de meta que cronometra una carrera de 100 m lisos?
El pistolazo se da en la salida.
62. ¿Cómo se podría medir, con sólo un cronómetro, la distancia que nos separa de la pared de una montaña cercana?
63. Teniendo en cuenta el ejercicio anterior, ¿a qué distancia se encuentra una montaña de un excursionista, si el eco tarda en oírse 4 s?
64. Las voces básicas masculinas de un coro son tenor, barítono y bajo. ¿Cuál de estas voces poseerá una mayor frecuencia?
65. De las voces del ejercicio anterior, la voz que poseerá una longitud de onda menor será: a) El bajo; b) el barítono; c) el tenor.
66. ¿Por qué en las viejas películas del oeste, los bandidos ponían su oreja sobre los raíles del ferrocarril para saber si se acercaba un tren?



CALOR Y TEMPERATURA

Ya que generalmente los términos «calor y temperatura» se confunden, para diferenciarlos hemos de tener en cuenta que toda la materia está formada por partículas pequeñísimas, llamadas moléculas, que poseen movimientos desordenados de mayor o menor intensidad y que, por tanto, llevan asociada una determinada energía que denominamos energía interna. La temperatura es una medida que expresa el grado de agitación de sus moléculas. Cuanto mayor sea la energía interna de un cuerpo, mayor será su temperatura (figura 155).



Figura 155

El fuego en un bosque de coníferas se propaga rápidamente, porque el aumento de temperatura que produce el calor desprendido evapora el agua de los árboles y matorrales y gasifica la resina.

CALOR

El calor es una forma de energía de la que están dotados todos los cuerpos y que aumenta o disminuye con la pérdida de energía térmica, si bien el cuerpo no pierde nunca la totalidad de su calor por muy frío que llegue a estar, ya que para ello debería alcanzar el llamado cero absoluto ($-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$), que en la práctica es inalcanzable.

Cuando se calienta un objeto, las moléculas que lo componen absorben la energía térmica, y esto hace que en el caso de los sólidos las vibraciones de dichas moléculas sean más intensas, y en el de líquidos y gases que sus moléculas se muevan con mayor velocidad; esto implica, en los gases, un aumento de la presión a volumen constante, o un aumento del volumen cuando la presión es fija. Asimismo puede producirse el intercambio de energía térmica entre

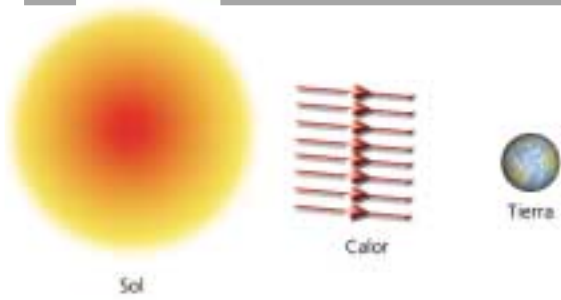


Figura 156

dos cuerpos que no estén en contacto (figura 156), pero que se encuentren a temperaturas distintas. Esto es posible gracias a que la energía térmica puede irradiarse por el espacio y producir efectos de resonancia con los átomos que vibren con frecuencias similares a la suya.

La generación de energía en forma de calor se verifica mediante la transformación de otros tipos de energía, como puede ser el movimiento relativo de las superficies de dos cuerpos en el caso de la fricción, o la transformación de la corriente eléctrica en calor mediante la incandescencia de la resistencia de la estufa al paso de la corriente eléctrica. Asimismo, la combustión hace que la energía química de los combustibles se transforme en calor. Por el contrario, el calor también es capaz de transformarse en otras formas de energía. Así, por ejemplo, en la máquina de vapor la energía calorífica generada en la caldera se trans-

forma en energía cinética. Por su parte, el fuego mismo convierte parte de la energía del combustible en calor y otra fracción en luz (figura 157). Finalmente, hay reacciones químicas que absorben calor durante su desarrollo (reacciones endotérmicas), como al cocer los alimentos en los que se almacena el calor en forma de energía química.

EFECTOS DEL CALOR

Los efectos del calor son muy variados. Entre ellos destaca la posibilidad de que la variación del calor de un cuerpo dé lugar a un cambio de estado.

Por ejemplo, cuando se aumenta la cantidad de calor de un cuerpo sólido, éste se llega a **fundir** (figura 158), y lo contrario sucede en el caso de un líquido cuya temperatura disminuye hasta alcanzar la correspondiente a la congelación, para la cual se **solidifica**.

Otros efectos del calor sobre los cuerpos son la **contracción** y la **dilatación** de éstos.



Figura 157

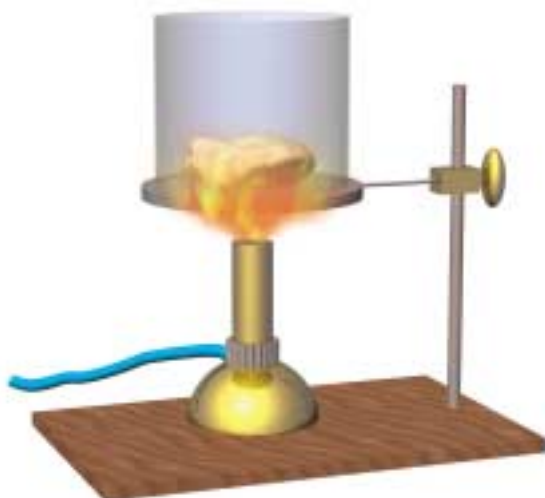


Figura 158



Figura 159

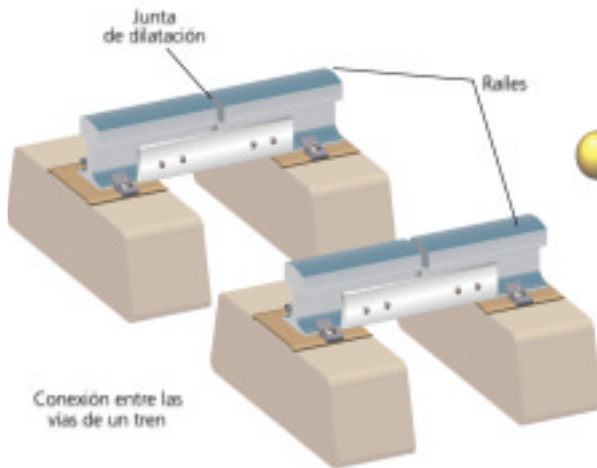


Figura 160

Cuando aumenta la agitación térmica de las moléculas de un sólido o un líquido como consecuencia de la elevación de su temperatura, las vibraciones aumentan y se produce una separación entre las moléculas que forman el cuerpo, lo que se traduce en un aumento de las dimensiones del cuerpo, o dilatación (figura 159).

Cuando el cuerpo vuelve a enfriarse, el proceso que se verifica es el contrario, y éste recupera sus dimensiones originales. Dicha dilatación puede ser lineal, cuando afecta a una sola dimensión del cuerpo; superficial, cuando afecta a dos, y volumétrica, cuando afecta a tres.

Para cada sustancia existen tres coeficientes de dilatación: lineal, λ , superficial, γ , y volumétrico, α , correspondientes a los tres tipos de dilatación. Un **coeficiente lineal** de dilatación es la longitud que aumenta la unidad de longitud cuando la temperatura aumenta un grado. Así, si λ de un material es igual a A y tenemos un cuerpo construido con este material, cuando la temperatura aumenta en un grado centígrado la longitud de este cuerpo aumenta A (en metros) por cada metro de longitud en su medida original. El valor de este coeficiente es muy pequeño y específico de cada sólido. En los líquidos y en los gases no se puede hablar de longitud ni de superficie. La definición de los demás coeficientes es muy parecida: El **coeficiente superficial** es lo que aumenta la superficie la unidad de superficie cuando la temperatura aumenta en un grado y la volumétrica es el aumento de volumen que sufre la unidad de volumen cuando la temperatura aumenta en un grado.



Figura 161

El **coeficiente volumétrico** es también específico de cada sólido y de cada líquido, pero los gases poseen todos el mismo coeficiente de dilatación volumétrico y éste es igual a $1/273$. Los gases se dilatan mucho más que los líquidos y éstos mucho más que los sólidos. El agua, una de las sustancias más abundantes del planeta, es una excepción. Así, por debajo de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, al convertirse en hielo, se dilata como consecuencia de la reordenación de sus moléculas, que quedan más separadas entre sí.

En estructuras metálicas de grandes dimensiones las dilataciones y contracciones como consecuencia de la variación de la temperatura de los cuerpos es mucho más evidente. Así, las estructuras metálicas aumentan sus dimensiones en verano y las reducen en invierno, motivo por el cual cabe diseñarlas de modo que estas dilataciones y contracciones, aunque relativamente pequeñas, no afecten a su estabilidad (figura 160). Esta contracción y dilatación por efecto del calor encuentra también aplicación en ciertos dispositivos que reciben el nombre de **bimetales**. Están formados por un par de láminas de metales con coeficientes de dilatación distintos soldados entre sí. La variación de la temperatura provoca dilataciones o contracciones distintas en ambos, por lo que el conjunto se flexiona más o menos (figura 161). Estos elementos se emplean frecuentemente como **termostatos**, abriendo y cerrando el circuito en el que están montados.

Mientras que las sustancias puras tienen valores muy concretos para aquellas temperaturas en las que se verifica su paso de un estado a otro, las mezclas y aleaciones presentan valores que dependen de sus purezas. Sin embargo, todas las sustancias necesitan absorber calor cuando pasan, por ejemplo, del estado sólido al líquido (**calor latente de fusión**), mientras que en el proceso contrario lo pierden. Dichos calores latentes, que se determinan por regla general para condiciones normales de presión (de unos

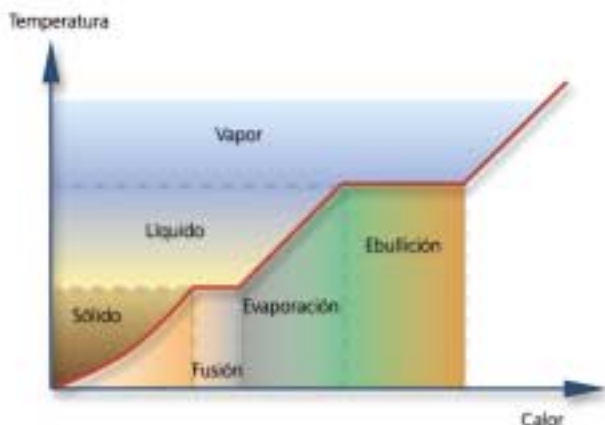


Figura 162

760 mm Hg, aproximadamente), se expresan en julios/kilogramo o, en el caso de sustancias puras, en julios/mol.

Durante el proceso de cambio de estado la sustancia absorbe o pierde energía latente, por lo que no se verifica modificación de la energía cinética de sus moléculas; esto explica que durante dicho proceso la temperatura del cuerpo no varíe (figura 162). En el proceso de fusión de una sustancia la energía absorbida del exterior se emplea para vencer la atracción entre los átomos o moléculas que la constituyen, de modo que ya no ocupen posiciones fijas dentro de la red cristalina del sólido y puedan moverse con cierta libertad.

Finalmente, cuando se verifica el proceso de transformación del líquido en vapor, lo que se produce es

una liberación completa de los átomos o moléculas que lo constituyen, que ya no experimentan atracción alguna y verifican movimientos al azar.

TEMPERATURA

Se emplea para medir lo frío o caliente que está un cuerpo. La temperatura de un cuerpo nos dice, además, en qué dirección se desplazará el calor al poner en contacto dos cuerpos cuyas temperaturas sean distintas, ya que el calor pasa siempre del cuerpo cuya temperatura es superior al que tiene la temperatura más baja, y el proceso continúa hasta que las temperaturas de ambos quedan igualadas.

ESCALAS TERMOMÉTRICAS

La temperatura se expresa mediante las llamadas **escalas termométricas** (figura 163). De las diversas existentes (Celsius, Fahrenheit, Réaumur, Kelvin), la que se emplea en física es esta última. La **escala Kelvin** o **absoluta** está fijada por dos valores concretos de la temperatura para los que se producen dos efectos muy determinados. A partir de dichos dos puntos se puede trazar una recta que nos indique qué valor corresponde a cada uno de los fenómenos físicos. Dicha recta tiene valor mínimo, el primero de los puntos estudiados, pero carece de límite superior. El primero de aquellos puntos es el llamado **cero absoluto**, y corresponde a la temperatura en que una molécula tiene una energía térmica nula. El segundo punto corresponde a la temperatura del punto triple del agua, aquella en la que pueden coexistir los esta-

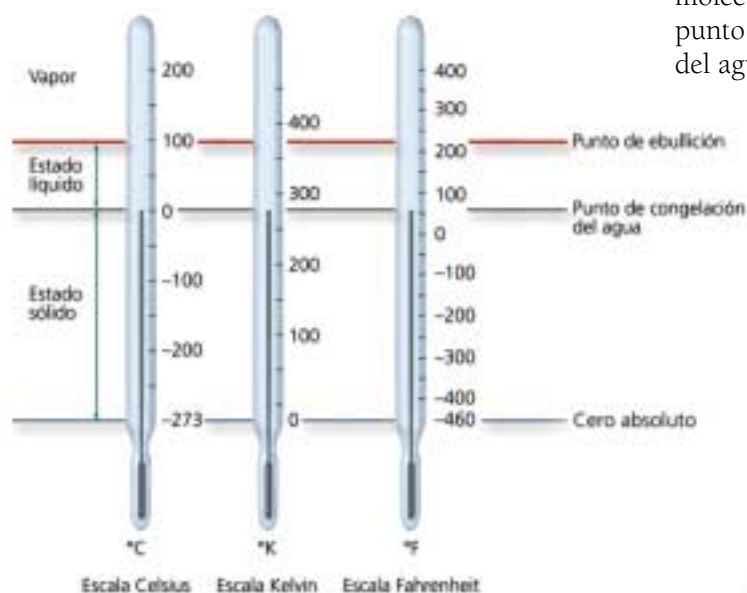


Figura 163

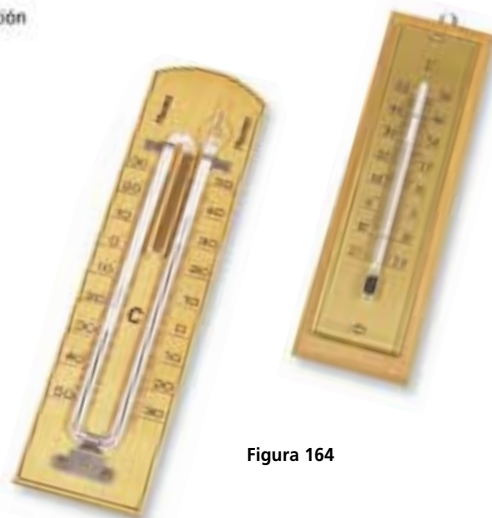


Figura 164

dos sólido (hielo), líquido y gaseoso (vapor de agua), y al que se ha asignado el valor 273,16. La escala está, además, dividida en un cierto número de intervalos que reciben el nombre de kelvin (K).

Las demás escalas de temperaturas se emplean en la vida cotidiana por su comodidad para expresar las temperaturas usuales. Así, por ejemplo, la **escala centígrada** o **Celsius** es aquella en la que el punto triple del agua corresponde a 0,01 °C, y el cero absoluto a -273,16 °C. O también se suele decir que es aquella que, a la presión de 1 atm, asigna 100 °C al punto de ebullición del agua.

TERMÓMETROS

La determinación de las temperaturas es la función que cumplen los **termómetros**, cuyos tipos dependen de la escala de temperaturas que se pretenda medir y de la precisión requerida para dicha medida. Sin embargo, todos ellos aprovechan alguna propiedad termométrica de la sustancia o material empleado en su construcción (modificación de la longitud, cambio de presión, etc.). Entre ellos cabe mencionar, por ejemplo, el termómetro de gas a volumen constante (que es extremadamente preciso y puede aplicarse entre -270 y 1.500 °C, si bien su empleo es algo engorroso, por lo que se reserva para operaciones de calibración), el de resistencia de platino (formado por una espiral de dicho metal y que, si bien es preciso en la gama de temperaturas que va de -260 a 630 °C, tiene una reacción lenta), el termopar (formado por dos metales diferentes unidos y cuya tensión varía en función de la temperatura, siendo su precisión especialmente alta en la gama de -630 a 1.000 °C) y el pirómetro (que se emplea para la medición de temperaturas extremadamente altas en los casos en los que el empleo de los termómetros convencionales es imposible; compara la radiación del objeto incandescente a medir con la de un filamento calibrado y permite la determinación de temperaturas superiores a 1.400 °C).

Sin embargo, los más conocidos son, con toda seguridad, los formados por un líquido encerrado en un capilar, como los familiares termómetros de mercurio (figura 164), para medir la fiebre de las personas, o los de alcohol, para determinar las temperaturas de las habitaciones. Si bien no son extremadamente precisos, presentan ventajas tales como su economía, la facilidad de transportarlos y que son capaces de indicar el margen de temperaturas que se presentan en los casos a los que se aplican.

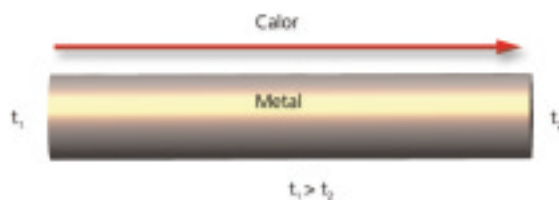


Figura 165

PROPAGACIÓN DEL CALOR

La difusión de calor a través de los cuerpos puede verificarse mediante tres procesos diferentes: el de conducción, el de convección y el de radiación.

CONDUCCIÓN

El proceso de **conducción** es el que se verifica principalmente en el caso de los sólidos (figura 165). Cuando se calienta una barra metálica por uno de sus extremos, suponiendo que no se pierda calor por sus lados, ésta muestra un gradiente de temperatura en toda su longitud entre los extremos caliente y frío. Este gradiente depende de la conductividad térmica de la sustancia; así, por lo general, cuanto mayor es la conductividad térmica, tanto menor es el gradiente térmico que se necesita para que el calor fluya desde un extremo al otro. Los metales, por ejemplo, son buenos conductores del calor (y de la electricidad) gracias a los electrones libres que tienen su estructura atómica. Éstos, al calentarse, se mueven con mayor rapidez y transmiten el calor por todo el metal. En cambio, los sólidos, en los que los electrones están en posiciones fijas, son malos conductores del calor, ya que éste se transmite como consecuencia del aumento de vibración de los átomos y moléculas que los constituyen, por lo que el proceso es más lento que en el caso de los metales.

CONVECCIÓN

La **convección** es el proceso mediante el cual se difunde el calor en líquidos y gases. Dicho proceso se basa en la formación de corrientes en el seno del líquido o gas que hacen que ascienda el caliente y descienda el frío. Es lo que sucede en una olla colocada a calentar. Si el líquido contiene partículas

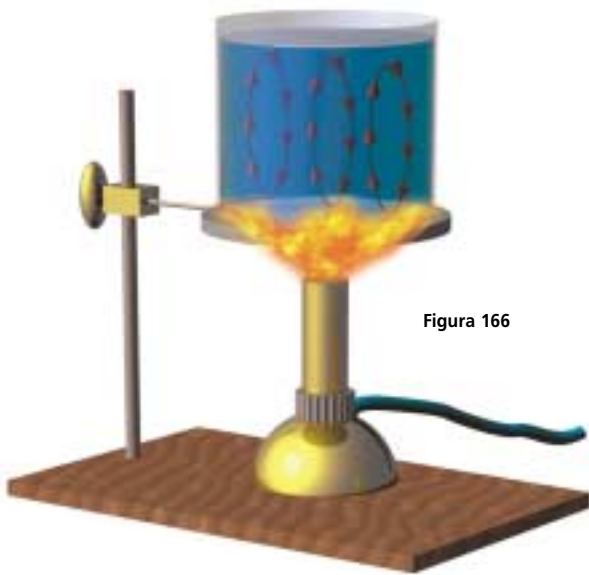


Figura 166

en suspensión, podemos observar que éstas ascienden desde el fondo y vuelven a descender, mostrándonos el camino seguido por las corrientes en el seno del fluido (figura 166).

RADIACIÓN

Finalmente, la **radiación** es un proceso que se basa en las radiaciones térmicas que emiten todos los cuerpos y que se encuentran en el rango de las frecuencias infrarrojas del espectro electromagnético (figura 167). La cantidad de energía que irradia un cuerpo depende de su temperatura, siendo mayor cuanto más caliente está, si bien viene determinada también por el tipo de superficie del cuerpo. La radiación térmica atraviesa las sustancias que son transparentes a ella sin producir aumento de su temperatura, y experimenta (al igual que la luz) reflexión por superficies blancas y absorción por las negras.

Un tipo de objeto especial irradia la mayor cantidad de calor y absorbe toda la energía térmica que le llega: es el cuerpo negro. Sin

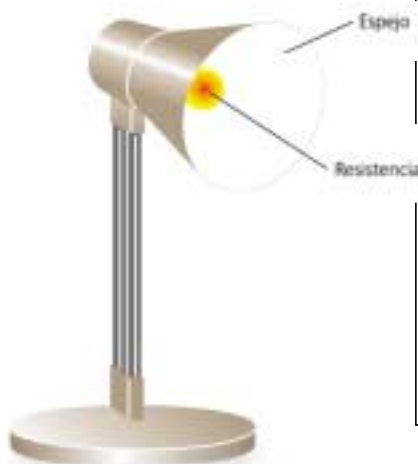


Figura 167

embargo, su importancia radica en su trascendencia teórica, ya que a nivel práctico todos los cuerpos, a temperaturas suficientemente altas, empiezan a emitir luz y radiación térmica. Así, un objeto caliente emite una gama de longitudes de onda cuyo máximo depende de la temperatura absoluta del cuerpo. Por esta razón podemos observar en los cuerpos muy calientes una modificación de su color que va desde el rojo vivo cuando aún están relativamente fríos, hasta el blanco, que aparece cuando alcanzan las temperaturas más altas.

AUTOEVALUACIÓN

67. Dos cuerpos puestos en contacto, ¿adquieren la misma temperatura o la misma cantidad de calor? ¿Cómo?
68. ¿Qué es un bimetálico y para qué sirve?
69. ¿Cómo varía la temperatura durante un cambio de estado?
70. ¿Existen temperaturas negativas en la escala Kelvin?
71. Explica brevemente las tres formas de propagación del calor.
72. Si el calor latente de fusión del hielo es de 333 kJ/kg, ¿puedes calcular el calor necesario para fundir un cubito de hielo de 25 g?
73. Calcula el calor necesario para fundir el cubito de hielo del ejercicio anterior si éste se encuentra a una temperatura de cero grados Celsius o centígrados.
74. Si el acero tiene un coeficiente lineal de dilatación de $0,000.011/^\circ\text{C}$, ¿cuál sería la longitud de un carril de acero en verano, con una temperatura de 35°C , si su longitud en invierno, con una temperatura de 5°C era de 1 km.
75. Para que la calefacción sea más eficaz, ¿dónde se puede colocar el radiador?:
a) Junto al techo; b) en la pared más larga; c) cerca del suelo.
76. ¿Es posible construir un termómetro de agua para medir temperaturas entre 1 y 30°C ?



ESTADOS DE LA MATERIA

Llamamos estados de la materia a las formas que posee la materia atendiendo a su rigidez, reacción frente a la presión, capacidad de movimiento de las partículas, etc. Estos estados físicos, que dependen de las fuerzas de interacción existentes entre las partículas y de la temperatura, son tres: sólido, líquido y gaseoso (figura 168).



Figura 168
Esta fotografía de la Antártida reúne los tres estados de la materia: el sólido representado por los hielos perpetuos, el líquido por las aguas oceánicas y el gaseoso por la evaporación superficial del agua.

SÓLIDOS

Los **sólidos** se caracterizan porque los átomos y moléculas que los constituyen se atraen entre sí (fuerza de cohesión), lo que hace que sean rígidos y estén dotados de una determinada forma. Estos cuerpos pueden ser sólidos verdaderos, los que tienen estructura cristalina y cuyos átomos y moléculas ocupan posiciones definidas en la red (figura 169), o amorfos, que son aquellos que carecen de dicha

estructura cristalina. Los sólidos verdaderos tienen temperaturas de cambio de fase determinadas, y al alcanzarlas pasan a la fase correspondiente. Los metales, el hielo, el diamante, etc., son ejemplos de este tipo de sólidos. En cuanto a los sólidos amorfos (figura 170), al carecer de estructura cristalina, tampoco tienen puntos de cambio de fase específicos, siendo un ejemplo muy conocido de este tipo de sólidos el vidrio.



Cl



Na

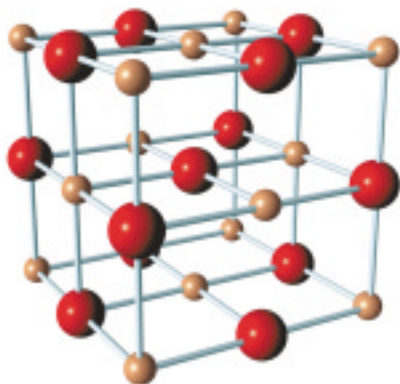


Figura 169



Figura 170



Figura 171

LÍQUIDOS

En los **líquidos**, si bien los átomos y moléculas presentan una cierta cohesión entre sí, no ocupan posiciones determinadas ni forman una red, por lo que pueden moverse unos respecto de los otros. Constituyen una fase intermedia entre el sólido y el gas. Dicha movilidad de sus átomos y moléculas hace que



Figura 172

los líquidos carezcan de forma determinada y adopten la del recipiente que los contiene (figura 171).

TENSIÓN SUPERFICIAL

Las fuerzas de cohesión existentes en los líquidos impiden que se expandan para tratar de ocupar la totalidad del volumen de que disponen. El hecho de que los líquidos ocupen parte o todo el recipiente que los contiene hasta un determinado nivel (adoptando, además, su forma) se debe a la acción de la gravedad sobre ellos. En una situación de gravedad nula, por ejemplo en las estaciones orbitales (es decir, en caída libre), los líquidos adoptan la forma que minimiza su superficie, o sea, la esférica. Esto se debe a que los líquidos presentan una propiedad que se denomina **tensión superficial**, debida a que, si bien en el interior del líquido los átomos y moléculas com-

pensan entre sí las mutuas atracciones, en la superficie de éste existe un predominio de las fuerzas que actúan desde el interior en detrimento de las del exterior, por lo que resulta un efecto total de tracción hacia el interior, que obliga a que la superficie del líquido se comporte como si formase una piel tensa, que permite que algunos organismos caminen sobre él (figura 172).

Los valores de la tensión superficial son diferentes para los diversos líquidos, dependiendo de ésta que el líquido en cuestión moje o no la sustancia con la que entra en contacto. Así, por ejemplo, el mercurio presenta un valor muy alto de tensión superficial, por lo que una gota de mercurio depositada sobre una placa de vidrio adopta una forma abultada y no lo moja.

En cambio, la situación para el agua es diferente, ya que en este caso la adherencia existente entre los átomos y moléculas del agua y el vidrio puede vencer la resistencia de la tensión superficial, por lo que el agua moja el vidrio. Asimismo, si la cohesión interna de un líquido es capaz de vencer la adherencia de éste con la sustancia que le rodea, el líquido adopta una forma que minimiza su superficie (el ejemplo son las gotas esferoides de la lluvia). La interacción entre la adherencia y la cohesión queda patente al comparar dos tubos iguales llenos, respectivamente, con mercurio y agua (figura 173). En el primer caso el mercurio muestra un menisco convexo, producto de la preponderancia de sus fuerzas de cohesión, mientras

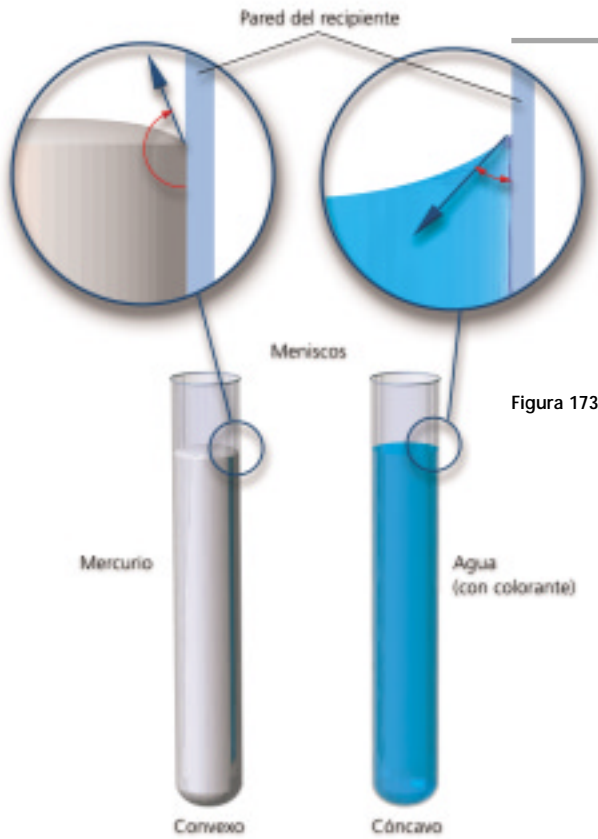


Figura 173

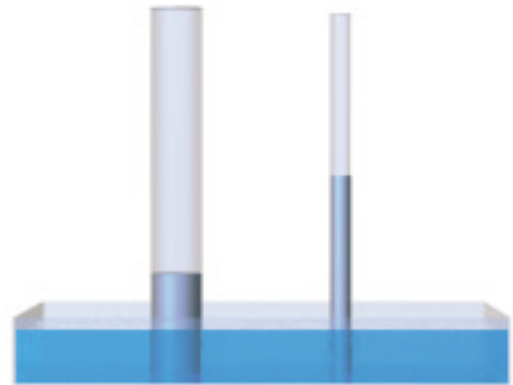


Figura 174

situarse a una altura superior a la del nivel del agua en el recipiente, siendo tanto mayor la altura hasta la que asciende el líquido cuanto más fino es el capilar empleado.

GASES

que en el segundo el agua origina un menisco cóncavo, que demuestra el predominio de la adhesión con el vidrio de las paredes del tubo.

CAPILARIDAD

Cuando un líquido se encuentra en el interior de un tubo extremadamente delgado (capilar), o entre dos láminas muy próximas, su comportamiento muestra algunas peculiaridades. Este fenómeno recibe el nombre de **capilaridad** (figura 174). En el caso del agua, al introducir un capilar en un recipiente lleno de agua, ésta asciende por el interior del capilar hasta

Los **gases** están constituidos por partículas que se mueven con entera libertad unas respecto de las otras y que carecen de cohesión. Si bien no tienen forma propia y adoptan la del recipiente que los contiene, como los líquidos, los gases tienden, además, a ocupar la totalidad del volumen del mismo (figura 175).

TEORÍA CINÉTICA

La descripción del estado gaseoso y de las transformaciones que experimentan los gases se realiza mediante la denominada teoría cinética de los gases y se basa en las llamadas leyes de los gases.

La teoría cinética de los gases se fundamenta en la concepción de que éstos están compuestos por átomos o moléculas que se mueven con gran rapidez y en direcciones al azar. Cada una de dichas partículas posee una energía cinética (de aquí el nombre de la teoría) que depende de su temperatura. Además, se considera que tales partículas experimentan choques perfectamente elásticos, es decir, que cuando colisionan entre sí, conservan sus velocidades (si bien cambian sus direcciones), y el choque no representa una pérdida de energía. Además, dicha teoría supone que el volumen ocupado por las partículas, comparado con el que ocupa el gas del que forman parte, es despreciable, además de considerar que la atracción mutua entre ellas es asimismo nula. Finalmente, el

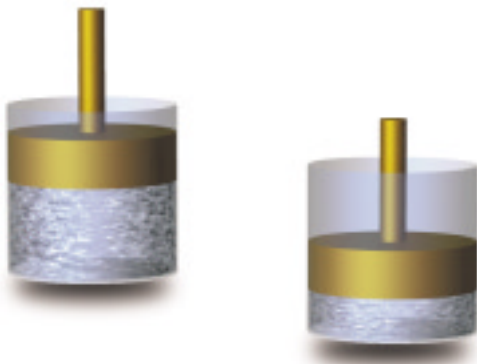


Figura 175



Figura 176

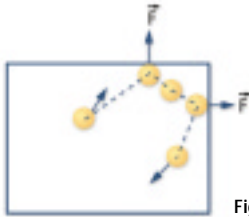


Figura 177

tiempo que media entre colisiones se considera tan grande que el que supone la colisión se admite como despreciable (figura 176).

Los choques de los átomos y moléculas de un gas son únicamente uno de los tipos de choque existentes en los gases, ya que también chocan con las paredes del recipiente que los contiene, ejerciendo una fuerza contra ellas que es una función del propio choque contra la pared (es decir, de la energía cinética que anima a la partícula). Los choques, al ser perfectamente elásticos, no suponen pérdida de energía cinética para las partículas, si bien es evidente que cambian la dirección de la velocidad.

Por tanto, la presión ejercida sobre las paredes del recipiente es fuerza media por unidad de superficie (figura 177).

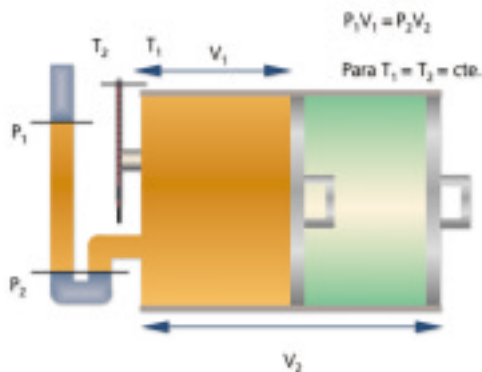


Figura 178

LEYES DE LOS GASES

La descripción del comportamiento de los gases en función de su presión, volumen y temperatura obedece a las llamadas leyes de los gases, que confirman que dichas magnitudes están relacionadas entre sí y que coinciden con los resultados de la teoría cinética de los gases. Consideramos primero la relación existente entre el volumen y la presión de un gas. Dicha relación se expresa mediante la **ley de Boyle-Mariotte** (figura 178), que afirma que para una temperatura constante, la presión ejercida por una masa de gas sobre las paredes del recipiente que la contiene es inversamente proporcional al volumen que dicho gas ocupa. La ley se expresa como: $P \cdot V = \text{constante}$ (para una temperatura determinada), donde P es la presión y V representa el volumen (figura 179). Desde el punto de vista de la teoría cinética de los gases, esta ley es correcta, ya que al reducirse el volumen que ocupa un gas, a temperatura constante, los átomos o moléculas que lo componen deben chocar con mayor frecuencia con las paredes, por lo que ha de aumentar la presión.

La relación entre el volumen y la temperatura viene dada por la **primera ley de Gay-Lussac**, que afirma que para una presión que se mantenga constante, existe una proporcionalidad entre el volumen que ocupa el gas y su temperatura, es decir, que la relación es: $V/T = \text{constante}$, donde V es el volumen y T la temperatura absoluta (figura 180). Desde el punto de vista de la teoría cinética de los gases, la ley tam-

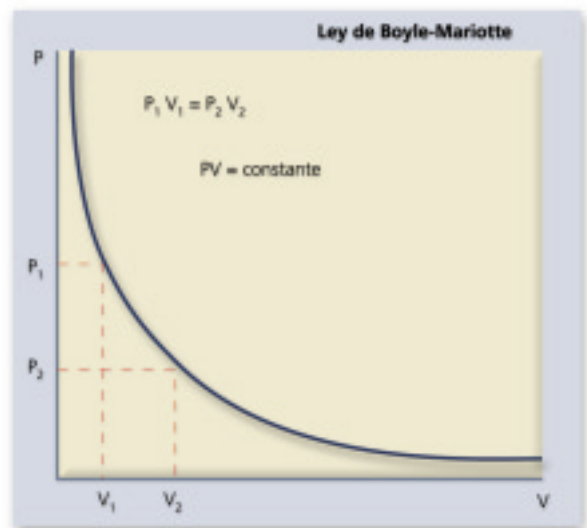


Figura 179



Figura 180

bién es aceptable, ya que el aumento de la temperatura hace que aumente la energía de los átomos o moléculas. Dicho aumento debe traducirse en una mayor velocidad (y, por tanto, choques más frecuentes) y choques más fuertes con las paredes del recipiente; o sea, un aumento de la presión. Por consiguiente, si se desea que la presión permanezca constante, es necesario que aumente el volumen (figura 181).



Figura 182



Figura 181

Finalmente, consideraremos la **segunda ley de Gay-Lussac**, que se deduce a partir de las dos anteriores y que relaciona la presión del gas con su temperatura cuando el volumen es constante; es decir, $P/T = \text{constante}$ (a volumen constante), donde P es la presión y T la temperatura. Estas tres leyes dan finalmente la ecuación de estado.

Sin embargo, las leyes que hemos tratado son válidas únicamente para los denominados **gases ideales**, es decir, aquellos que cumplen en toda circunstancia las hipótesis que establece la teoría cinética de los gases, lo que no ocurre con los gases reales. Éstos tienen un comportamiento que diverge en cierta medida del descrito por las leyes enunciadas, lo que hace que éstas sean válidas únicamente para valores moderados de las presiones y las temperaturas.

CAMBIOS DE ESTADO

Cuando se produce un aumento de la temperatura de un elemento, se verifica un incremento de la energía cinética de los átomos y moléculas que lo constituyen, lo que en el caso de los sólidos se traduce en una vibración más violenta alrededor de las posiciones que ocupan en la red cristalina, y en el caso de líquidos y gases en un aumento de la velocidad con la que se mueven. Cuando la temperatura alcanza un cierto nivel (**temperatura de fusión**) (figura 182), los átomos y moléculas del sólido han adquirido ya suficiente energía cinética para vencer las fuerzas de cohesión que los mantienen inmóviles y ponerse en movimiento, por lo que el sólido se funde pasando a

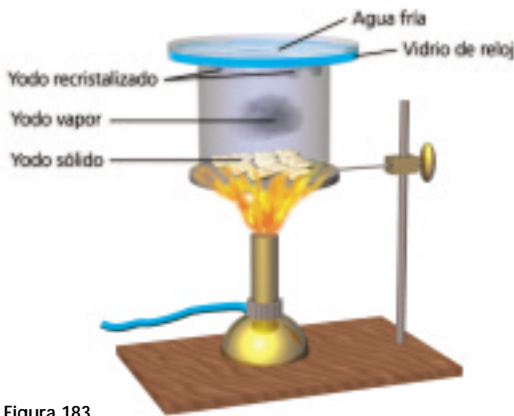


Figura 183

la fase líquida. El proceso se verifica también en sentido contrario, cuando un líquido se somete a una temperatura tan baja (**temperatura de solidificación**) que la energía cinética de sus átomos y moléculas disminuye hasta que es superada por las fuerzas de cohesión, instante en el que el líquido pasa a la fase sólida al congelarse.

Pero también existen sólidos que al calentarse no pasan por la fase líquida antes de llegar a la de gas, sino que lo hacen directamente, fenómeno que recibe el nombre de **sublimación** (figura 183) y que puede observarse, por ejemplo, en el caso del hielo seco.

El punto de fusión de las sustancias puede reducirse mediante el aumento de la presión a la que están sometidas, que es lo que sucede con el hielo que funde a cero grados al aumentar la presión. En este caso la disminución de nuevo de la presión implica la solidificación del líquido, fenómeno que se conoce con el nombre de «recongelación».

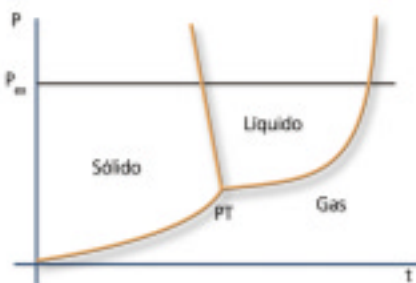


Figura 185

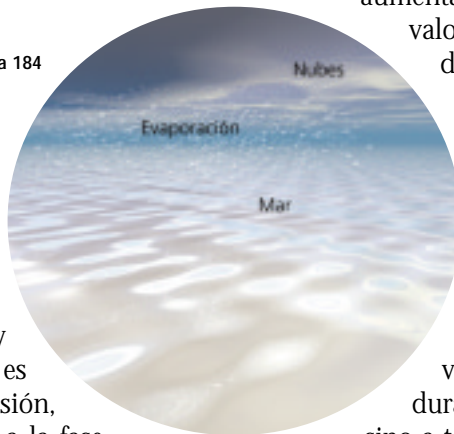


Figura 184

Cuando se calienta un líquido, éste pasa a gas o a vapor. Este proceso, llamado **evaporación** (figura 184), se verifica con más o menos intensidad por encima del cero absoluto ($-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$) para los átomos y moléculas de la superficie que alcanzan una energía cinética suficiente para escapar del sólido o líquido. El vapor situado sobre un líquido ejerce también su presión, llamada presión de vapor, que aumenta cuando se calienta el líquido. El valor de dicha presión de vapor es el que determina el instante en que arranca a hervir el líquido, y que es aquel en el que la presión de vapor es igual a la presión externa (figura 185), lo que explica el hecho de que los líquidos hiervan a temperaturas más bajas en las cumbres, ya que allí la presión ambiental es menor.

Por otra parte, la formación del vapor en el líquido no se limita, durante la ebullición, sólo a la superficie, sino a todo el volumen, lo que da lugar a la aparición de burbujas en su interior (figura 186). Cuando una sustancia que está en forma de gas o vapor se enfría, se produce un proceso llamado **condensación**, gracias al cual, y por debajo de la temperatura de ebullición, el gas o vapor pasa a fase líquida.

AUTOEVALUACIÓN

77. La cera es un sólido que se puede ablandar con el calor de la mano. ¿De qué tipo es?: a) Sólido cristalino; b) sólido amorfo; c) sólido verdadero.
78. ¿A qué se debe que las gotas de cualquier líquido al caer sean casi esféricas?
79. Para que no se mueran las plantas podemos poner agua debajo de la maceta. ¿De qué propiedad de los líquidos nos aprovechamos?: a) De la tensión superficial; b) de la evaporación; c) de la capilaridad.
80. La forma que tiene el menisco de la superficie de los líquidos depende de:
 - a) La naturaleza del líquido;
 - b) la naturaleza del líquido y la del recipiente;
 - c) la naturaleza del recipiente.

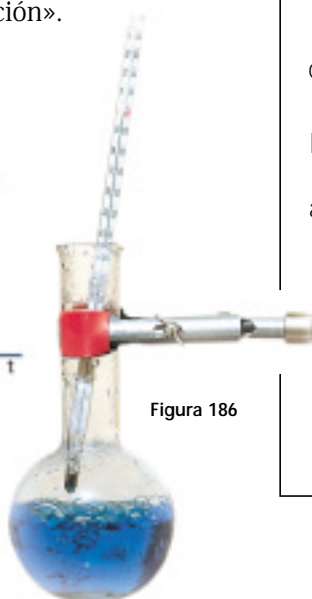


Figura 186



PESOS Y MEDIDAS

Dado que las relaciones mediante las que se expresan las leyes fundamentales que obtiene la física acerca del comportamiento de la materia se basan en la medición de las variaciones de ciertas cantidades o propiedades (figura 187), es necesario disponer de un número de cantidades lo más reducido posible que permitan obtener las demás, así como reducir la expresión de dichas magnitudes a un cierto número de cantidades. Este criterio permite distinguir entre magnitudes fundamentales y magnitudes derivadas.



Figura 187
Las nuevas tecnologías han dotado a la ciencia de aparatos de medida cada vez más sensibles y precisos.

Las magnitudes fundamentales son las que no pueden derivarse de ninguna otra y constituyen la base de los sistemas de medida empleados en la mecánica. Son la longitud, indicada mediante l , la masa, que se expresa por m , y el tiempo, que se indica mediante t . Sin embargo, la elección de dichas magnitudes se deriva de consideraciones de orden práctico y no implica que éstas representen pro-

piedades fundamentales de la energía o la materia. Por el contrario, las magnitudes derivadas son aquellas que se obtienen a partir de las fundamentales por combinación de ellas o como consecuencia de la aplicación de las leyes físicas. Así, por ejemplo, la velocidad es la relación entre la longitud y el tiempo, siendo las unidades que se emplean para expresarla el metro/segundo.

Figura 188

PROCESOS DE MEDIDA

Se basan en la comparación de una magnitud con otra de la misma especie que se toma como patrón o unidad. Los procesos de medida pueden realizarse en la física de dos modos: mediante la comparación directa con el patrón empleado (**medida directa**), o por aplicación directa de una teoría, midiendo directamente un valor a partir del cual se puede deducir el valor de la magnitud buscada por medio de la aplicación de la ley (**medida indirecta**). Un ejemplo del primer tipo lo constituye la determinación de la longitud de un objeto mediante el empleo de una cinta métrica, mientras que la determinación de la intensidad de la corriente que pasa por un circuito, a partir de la desviación que ésta origina en un imán suspendido libremente sobre ella, es un ejemplo del segundo método.

A pesar de existir diversos sistemas de unidades, en física se emplea el llamado **Sistema Internacional (SI)**. Dicho sistema considera siete unidades básicas, que son: para la longitud, el metro (figura 188); para la masa, el kilogramo (figura 189); para el tiempo, el segundo; para la intensidad de corriente eléctrica, el amperio; para la temperatura, el kelvin; para la intensidad luminosa, la candela, y para la cantidad de materia, el mol. Véase la tabla superior.

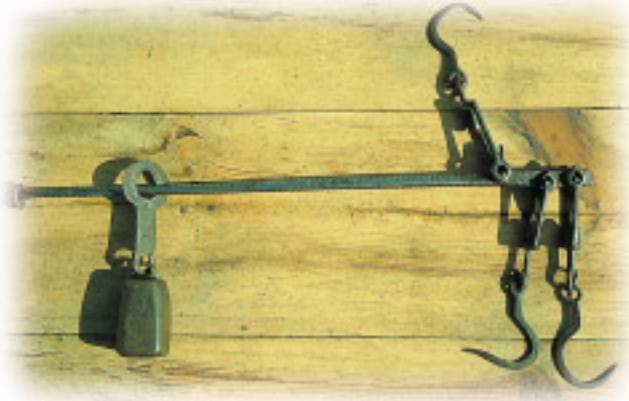
UNIDADES FUNDAMENTALES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

Nombre	Símbolo	Magnitud
Metro	m	Longitud
Kilogramo	kg	Masa
Segundo	s	Tiempo
Amperio	A	Intensidad de corriente eléctrica
Kelvin	K	Temperatura
Bujía nueva o candela	cd	Intensidad de luz
Mol	mol	Cantidad de materia

Asimismo, dicho sistema acepta una serie de unidades derivadas de las básicas, que reciben un nombre propio; por ejemplo la energía, cuya unidad es el julio (neutonio · metro), o la fuerza, cuya unidad es el newtonio (kilogramo · metro/segundo²). Véase la tabla inferior.

UNIDADES DERIVADAS

Magnitud	Nombre	Símbolo	Expresión dimensional
Cantidad de electricidad	Culombio (Coulomb)	C	$s \cdot A$
Capacidad	Faradio (Farad)	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Inductancia	Henrio (Henry)	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Frecuencia	Hercio (Hertz)	Hz	s^{-1}
Energía	Julio (Joule)	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Fuerza	Neutonio (Newton)	N	$m \cdot kg \cdot s^{-1}$
Resistencia	Ohmio (Ohm)	Ω	$m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Presión	Pascal (Pascal)	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Conductancia	Siemensio (Siemens)	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Inducción magnética	Tesla	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Potencia	Vatio (Watt)	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Tensión eléctrica	Voltio (Volt)	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Flujo de inducción magnética	Weberio (Weber)	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$



Balanza romana

Figura 189

PATRONES INTERNACIONALES

Las unidades fundamentales del sistema internacional, al igual que para los demás sistemas de unidades, se definen de acuerdo con patrones aceptados internacionalmente, y que para este caso son las siguientes: el metro, cuyo símbolo es m y que representa la distancia que recorre un rayo luminoso en el vacío en una fracción de segundo expresada mediante el cociente $1/299792458$. El kilogramo, cuyo símbolo es kg y se define como la masa de un patrón de platino iridiado y que se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de París en las condiciones fijadas por la primera Conferencia General de Pesas y Medidas (1889). De forma cilíndrica, sus dimensiones son de 39 mm de diámetro por 39 mm de altura. El segundo, que se simboliza mediante s y representa la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondientes a la transición entre dos niveles superfinos del estado fundamental del átomo de ^{133}Cs (Cesio 133). El amperio, cuyo símbolo es A y que corresponde a la intensidad de corriente eléctrica que al circular por dos conductores rectilíneos, de grosor despreciable, paralelos entre sí y separados mutuamente por una distancia de un metro, genera una fuerza mutua de atracción de $2 \cdot 10^{-7}$ newtonios por metro de línea paralela. El kelvin, que se indica mediante K y equivale a $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. La candela o bujía nueva, que se simboliza por cd y se define como la intensidad luminosa que irradian, en dirección normal,

$1/600.000 \text{ m}^2$ de la superficie de un cuerpo negro, a la temperatura de solidificación del platino y a una presión de 101.325 Pa. Y, finalmente, el mol, que representa la cantidad de materia de un sistema que contiene tantas entidades elementales (átomos, moléculas, etc.) como átomos hay en 0,012 kg del isótopo C-12. Dicho número coincide con el número de Avogadro.

PREFIJOS

El Sistema Internacional (SI) acepta asimismo una serie de coeficientes (llamados prefijos), que multiplican o dividen el valor de una magnitud expresada en cierta unidad sin necesidad de asignarle un nombre diferente, como sucede en los sistemas tradicionales, de unidades de medida. Dichos prefijos se emplean de forma individual, no estando permitido combinarlos. Se indican mediante la anteposición de una partícula al nombre de la unidad, como, por ejemplo, en el caso del voltio (V), kilovoltio (kV) para expresar 1.000 voltios.

Los prefijos aceptados por el Sistema Internacional y sus valores numéricos se indican en la tabla inferior.

PREFIJOS DE SUBMÚLTIPLOS Y MÚLTIPLOS		
Prefijos	Símbolo	Valor
atto	a	10^{-18}
femto	f	10^{-15}
pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
mili	m	10^{-3}
centi	c	10^{-2}
deci	d	10^{-1}
deca	da	10^1
hecto	h	10^2
kilo	k	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}

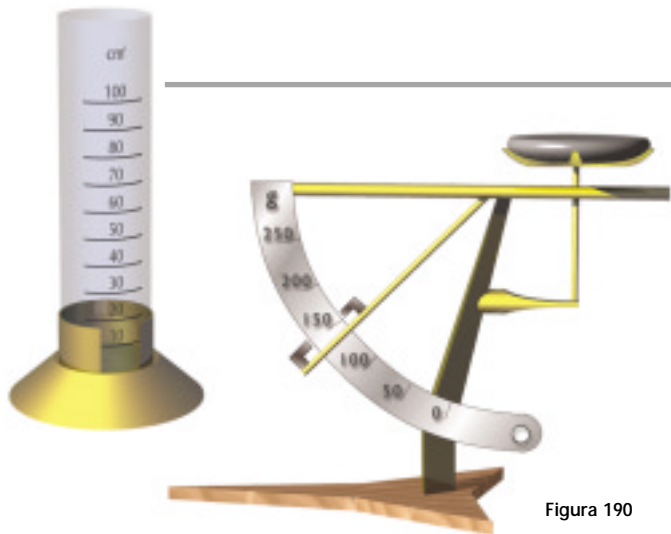


Figura 190

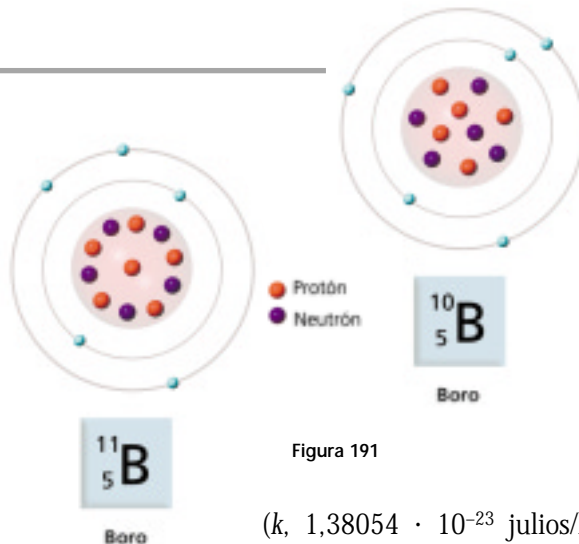


Figura 191

CONSTANTES UNIVERSALES

El proceso de medición está afectado por los errores de medida, debidos a los propios de los aparatos utilizados para llevarla a cabo o a los que pueda cometer el operador (figura 190). La magnitud del error cometido depende de la sensibilidad de la medida realizada por el instrumento, motivo por el cual en la indicación de los valores en física se hace mención de los errores asociados a la medida.

Asimismo, las leyes de la física incluyen ciertas **constantes universales**, que imponen un límite a los resultados obtenidos mediante la aplicación de las leyes que las incluyen: los resultados no pueden tener una exactitud mayor que la de la medida de la propia constante.

Entre las constantes de este tipo destacan la velocidad de la luz en el vacío, que se expresa mediante la letra c y cuyo valor es de $2,997925 \cdot 10^8$ metros/segundo, si bien generalmente se emplea el valor $3 \cdot 10^8$. Las masas del electrón (m_e , $9,10908 \cdot 10^{-31}$ kg), del protón (m_p , $1,67252 \cdot 10^{-27}$ kg) y del neutrón (m_n , $1,67482 \cdot 10^{-27}$ kg), así como las cargas tanto del electrón (e , $1,60210 \cdot 10^{-19}$ culombios, negativa) como del protón ($1,60210 \cdot 10^{-19}$ culombios, positiva) (recordemos que el neutrón no tiene carga eléctrica) (figura 191). Asimismo, se considera el radio del electrón (r_e , $2,817777 \cdot 10^{-15}$ metros) y la relación entre la carga y la masa de dicha partícula (e/m_e , $1,758796 \cdot 10^{11}$ culombios/kilogramo). Junto con el número de Avogadro (N_A , $6,02252 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol), están también diversas constantes, como la de Boltzmann

(k , $1,38054 \cdot 10^{-23}$ julios/kelvin), la de Faraday (F , $9,64870 \cdot 10^4$ culombios/mol) (figura 192), la de la gravitación universal (G , $6,670 \cdot 10^{-11}$ newtonios \cdot metro²/kilogramo²), la de Planck (h , $6,62559 \cdot 10^{-34}$ julios \cdot segundo) y la de Rydberg (R_∞ , $1,097373 \cdot 10^7$ metros⁻¹).

ANÁLISIS DIMENSIONAL

Las ecuaciones de la física deben ser coherentes en cuanto a las unidades empleadas en ambos miembros de aquéllas, es decir, ambos miembros deben estar expresados en las mismas unidades, lo que se com-

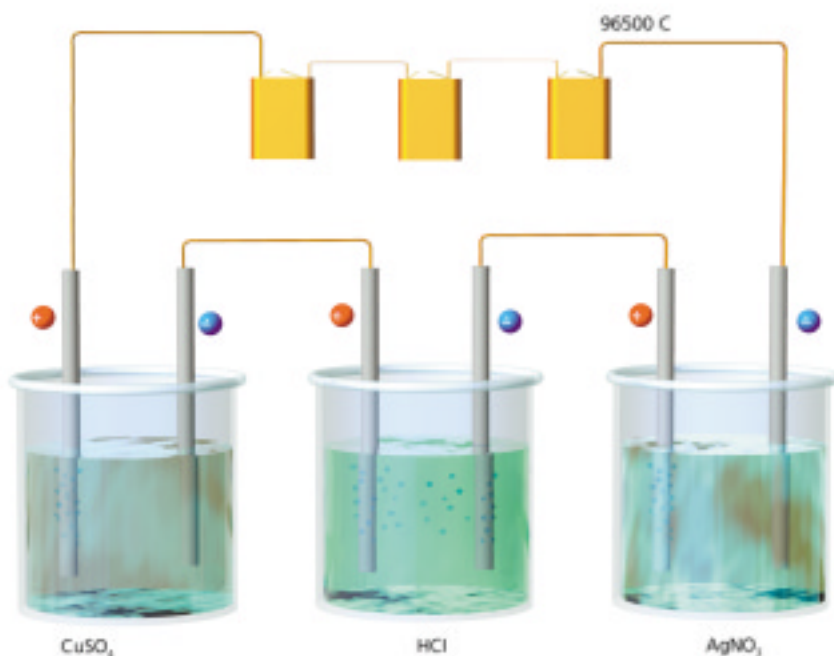


Figura 192

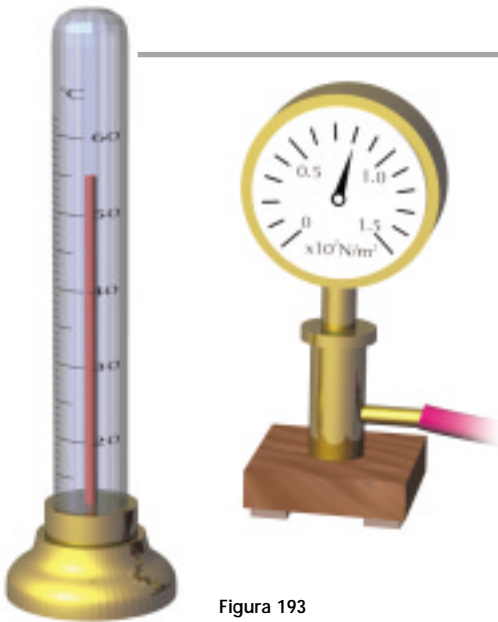


Figura 193

SISTEMAS DE UNIDADES

Entre los diversos sistemas de unidades empleados, cabe mencionar, por su importancia histórica, algunos de ellos. Así, mencionaremos el **sistema cegesimal**, gaussiano o CGS, cuyas unidades fundamentales son: para la longitud, el centímetro (cm); para la masa, el gramo (g), y para el tiempo, el segundo (s); el **sistema MKS**, que emplea como unidades fundamentales el metro (m), el kilogramo (kg) y el segundo (s) y su extensión, el **sistema MKSA**, que añade a las tres anteriores el amperio (A). Por otra parte, el **sistema métrico decimal** tiene una importancia histórica fundamental, ya que fue el primer intento de homogeneización de los sistemas de unidades. Establecido en Francia en el siglo XVIII y basado en las unidades de metro (longitud), kilogramo (masa) y segundo (tiempo), ha servido como base para el establecimiento del Sistema Internacional (SI).

prueba mediante el empleo del llamado **análisis dimensional**. Para ello se descompone cada uno de los miembros en términos de las tres magnitudes fundamentales, que para estos efectos se expresan del siguiente modo: longitud [L], masa [M] y tiempo [T]. Por ejemplo, en el caso de la superficie (expresada en metros cuadrados), ésta es el resultado del producto de dos longitudes (expresadas en metros). Sustituyendo estas unidades por la magnitud correspondiente se obtiene en este caso, para la superficie, $[L] \cdot [L] = [L]^2$.

De este modo es posible determinar la corrección de una ecuación mediante el análisis de las dimensiones de sus miembros. Por ejemplo, si tomamos la ecuación de estado o ecuación general de los gases (figura 193), que relaciona la presión (P) y el volumen (V) con el número de moles (n) y la temperatura (T) a través de la llamada constante universal de los gases (R), obtenemos lo siguiente: para el primer miembro tenemos que la presión P se expresa en el Sistema Internacional (SI) en N/m^2 (neutnios por metro cuadrado), mientras que el volumen se indica en m^3 (metros cúbicos). Para el segundo la temperatura se expresa en kelvin (K). De este modo, y suponiendo por simplicidad que tratamos con 1 mol ($n = 1$), obtenemos que la expresión, en cuanto a las unidades, es: $(\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{m}^3 = R \cdot \text{K}$, es decir, $\text{N} \cdot \text{m} = R \cdot \text{K}$.

Sin embargo, como hemos visto, $\text{N} \cdot \text{m}$ es la definición de la unidad de energía, el julio, por lo que podemos escribir $\text{J} = R \cdot \text{K}$, por lo que la constante R resulta ser J/K , que coincide con su definición, que le asigna un valor de $8,31 \text{ J}/\text{K} \cdot \text{mol}$. Expresado en otras unidades su valor es $0,082 \text{ atmósferas} \cdot \text{litro}/\text{K} \cdot \text{mol}$.

AUTOEVALUACIÓN

81. Cita la unidad de carga eléctrica o cantidad de electricidad en el Sistema Internacional y alguno de sus submúltiplos.
82. ¿Qué es un mol?
83. ¿Es la densidad una magnitud fundamental?
84. Si en las dimensiones de una fuerza existe la masa, en las dimensiones de una energía: a) Habrá también la masa; b) la masa estará elevada al cuadrado; c) la fuerza y la energía no tienen ninguna relación.
85. ¿Cuál es la relación entre el newtonio y las unidades fundamentales del SI?
86. ¿Se puede saber si una medida puede ser exacta y no tener ningún error?: a) Sí, con toda seguridad; b) nunca, ya que tiene las limitaciones del aparato de medida; c) no siempre, depende de la magnitud.
87. Expresa $3 \cdot 10^{16} \text{ g}$ anteponiendo prefijos.
88. Si la potencia tiene unas dimensiones: $[M] \cdot [L]^2 / [T]^3$ y su unidad en el SI se llama vatio, expresa el vatio mediante unidades fundamentales.

